



Терентьев О.М., Крючков А.И., Клещов А.Й., Гонтарь П.А.

РЕЗОНАНСНЕ ЕНЕРГООЩАДНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

ТОМ 3

ПЛАЗМО-МЕХАНІЧНЕ РУЙНУВАННЯ ВИБОЇВ

Монографія

Рекомендовано Вченою радою Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Київ – 2018

Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного технічного університету України
«Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського»
(протокол № 5 від 14 травня 2018)

За повного або часткового відтворення матеріалів даної публікації
посилання на видання обов'язкове

Рецензенти:

Войтенко Ю.І. - доктор технічних наук, головний науковий співробітник Українського державного геологорозвідувального інституту Міністерства екології та природних ресурсів України.

Бойко В.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач науково-дослідної лабораторії з проблем сейсмічної безпеки технологічних вибухів Інституту гідродинаміки НАН України.

Відповідальний редактор:

Ткачук К.К. – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Р 34 Резонансне енергоощадне руйнування гірських порід: монографія / Том 3. **Плазмо-механічне руйнування вибоїв.** [Текст] / О.М. Терентьев, А.І. Крючков, А.Й. Клещов, П.А. Гонтарь – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 147 с.
ISBN 978-617-7185-24-5

Монографія направлена на підвищення продуктивності механічного руйнування гірських порід на кар'єрах шляхом удосконалення технології плазмо-механічного руйнування. Встановлено зміну модулю пружності I роду за квадратичною залежністю від енергії молекулярних зв'язків кристалічних структур, що дозволило оцінити енергетичний потенціал гірських порід. Визначено залежності питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування гірських порід від індуктивності за унімодальним розподілом із позитивною асиметрією та від сили струму комбінованого навантаження за унімодальним розподілом із негативною асиметрією, що дозволило обрати раціональний режим комбінованого навантаження гірських порід. Досягнуто зниження питомої енергоємності руйнування гранітів на Пинязевицькому кар'єрі модернізованим буровим станком Sorco ROC L8 на 11 % з 61,38 кВт·год/м³ до 54,69 кВт·год/м³.

ISBN 978-617-7185-24-5

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕОРІЇ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	8
1.1 Аналіз теорій руйнування.....	8
1.2 Домінантні умови і вибір способу руйнування.....	14
1.3 Електротермічне руйнування.....	19
РОЗДІЛ 2 ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПЛАЗОМО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	27
2.1 Планування експерименту в умовних змінних.....	27
2.2 Планування експерименту в явному вигляді.....	34
2.3 Стенд досліджень руйнування гірських порід.....	39
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАЗМО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	41
3.1. Параметри потоку індуктивної плазми.....	41
3.2. Вплив внутрішньої енергії кристалічних структур гірських порід на модуль пружності І роду.....	48
3.3. Параметри руйнування кристалічних структур гірських порід плазмо- механічними навантаженнями.....	53
РОЗДІЛ 4 ПЛАЗМО-МЕХАНІЧНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	80
4.1. Підготовка дослідницької апаратури і зразків гірських порід.....	80
4.2. Вплив індуктивної плазми на гірські породи.....	84

4.3. Параметри плазмо-механічного руйнування кристалічних структур.....	99
РОЗДІЛ 5 ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ ПЛАЗМО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	111
5.1 Умови та планування промислової апробації.....	111
5.2 Плазмо-механічне руйнування рапаківіподібних гранітів.....	114
5.3. Економічна ефективність плазмо-механічного руйнування.....	118
ЗАКЛЮЧЕННЯ.....	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124
ДОДАТОК А Використане вимірювальне обладнання.....	141

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Асиметричний субрезонанс – тип резонансу з асиметричним профілем, що виникає в результаті інтерференції двох хвильових процесів.

БПР – блок плазмового руйнування.

в. о. – відносні одиниці.

ВП – вугільне підприємство.

ГОСТ – державний стандарт.

ГП – гірська порода

ДВНЗ – Державний вищий навчальний заклад.

ДСТУ – державний стандарт України.

ДП – державне підприємство.

КТП – квантова теорія поля.

Метод ЛКАО – метод лінійної комбінації атомних орбіталей.

Метод ККР – метод Коррінгі – Кона – Ростокера.

Метод ППХ – метод приєднаних плоских хвиль.

Мотивна одиниця - сукупність атомів, в якій з кожною точкою

кристалічної решітки пов'язана певна група атомів.

МПК – міжнародна патентна класифікація.

НДР – науково-дослідна робота.

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

ОЦК – об'ємно-центрована кубічна кристалічна решітка.

ОЦКП – ортогональне центральне композиційне планування.

ПЧЕ – повночинниковий експеримент.

РЭМ – растровий електронний мікроскоп.

ТКП – технічний кодекс сталої практики.

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю.

УДК – універсальний десятичний класифікатор.

Ч. – частина.

ISO - International Organization for Standardization.

ВСТУП

При розробці та удосконаленні технологій руйнування гірських порід, використовуються теорії механіки руйнування та тріщинуватості Гриффітса, Нейбера, Ірвіна та інших. Їх праці не враховують молекулярні зв'язки кристалічних структур та не пропонують вирішення задачі підвищення продуктивності механічного руйнування гірських порід на кар'єрах за рахунок використання енергетичного потенціалу гірських порід. Це не дозволяє виділити і корисно використовувати внутрішню енергію структур при відкритій розробці корисних копалин. Зовнішній електротермічний вплив, на відміну від інших, дає змогу руйнувати гірські породи за рахунок забезпечення субрезонансних режимів. Тому, доцільно продовжити вивчення руйнування гірських порід електротермічним впливом. Сумісне використання зовнішніх та внутрішніх джерел енергії зменшує енергоємність руйнування гірських порід (ГП) на кар'єрах. Це відбувається за рахунок попереднього ослаблення гірських порід плазмовою складовою комбінованого руйнування.

Питаннями зниження енергоємності руйнування ГП, при їх відкритому видобутку, під впливом зовнішніх енергетичних потоків займалися такі вітчизняні та закордонні вчені, як Бабат Г.І., Бартенєв Г.М., Болдирєв Г.Г., Воробйов А.А., Воробйов Г.А., Гриффітс А, Денисюк Т.Д., Додіс Я.М., Зінов'єв Н.Т., Нарісава І., Регель В., Сьомкін Б.В., Усов А.Ф., Фортон В.Е., Черепанов Г.П. та інші. Проте, у їх дослідженнях енергія молекулярних зв'язків розглянута як сила протидії зовнішньому енергетичному впливу. Не розглянуті можливості вивільнення та направлення цієї енергії на розвиток та поширення природної тріщинуватості. Класичне руйнування (різання, шарошкове, обертове, вибухове та інші) у комбінації з фізичним руйнуванням (термічне, імпульсне, гідравлічне тощо) кристалічної структури масивів дозволяє використовувати внутрішні та зовнішні джерела енергії. Їх сумісний вплив на ГП і на продуктивність її руйнування не був досліджений

наведеними вище вченими. Тому, є актуальним встановлення закономірностей підвищення продуктивності руйнування ГП фізико-механічними навантаженнями зовнішніх і внутрішніх енергетичних джерел для відкритої розробки родовищ корисних копалин. Актуальність обраної теми відповідає пункту 7, статті 4 глави 2 Директиви Європейського Парламенту та Ради «Про енергоефективність» 2012/27EU від 25 жовтня 2012 р.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРІЇ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

1.1 Аналіз теорій руйнування

Під дією зовнішнього і внутрішнього навантаження в гірській породі (ГП) накопичується потенційна енергія. Із збільшенням її до критичного значення, вона перетворюється на кінетичну і порода руйнується.

А. Гриффітс визначив [1], що поширення тріщини можливе, якщо при її збільшенні виділиться більше енергії, ніж потрібно для розриву міжатомних зв'язків у вершині тріщини. Теорія тріщин [1] формулює умови руйнування у вершині контуру тріщини. Розмір області пластичних деформацій у будь-якій точці контуру тріщини малий у порівнянні з відстанню цієї точки до найближчої межі тіла. Деформації не поширюються в сторону межі тіла, а переміщуються по дефектам внутрішньої структури. Відповідно до [2], варіант цієї умови на основі ідей А. Гриффітса і Г. Нейбера запропонований в 1957 р. Дж. Р. Ірвіном. Напруження обчислюються в припущенні ідеальної пружності тіла. В цих роботах запропоновано моделі механізму руйнування у вершині тріщини. Визначено, що крім зовнішніх дефектів і домішок, на зниження міцності кристалів впливають внутрішні дефекти. У 1959 р. модель Леонова – Панасюка [3], визначає, що в околі вершини тріщини є область ослаблених зв'язків. Її товщина, в рамках теорії малих деформацій, вважається рівною нулю. Крім того, передбачається, що протилежні береги цієї області притягуються напруженням, що є константою матеріалу. На початку області ослаблених зв'язків, що збігається з кінцем тріщини, стрибок нормального зміщення в момент руйнування стає рівним константі матеріалу. Цей критерій застосовується до тріщин у пружно-пластичних тілах, якщо пластичні деформації зосереджені вздовж деякого тонкого шару на берегах тріщини. Останній випадок реалізується, наприклад, в тонких пластинах з маловуглецевої сталі [3]. Вказані моделі відрізняються схемою розриву в кінці крихкої тріщини. Вони

еквівалентні в тому, що призводять до умови Гриффітса – Ірвіна [3]. Розрахунок на міцність при дії циклічних напружень ґрунтується на розгляді переходу елемента від стану робочого навантаження до граничного стану. Це створює передумови до руйнування. Коли випадкове накопичення дефектів зростає до критичного значення, завершується фаза виникнення передумов руйнування і починається термофлуктуаційне зростання тріщин [4]. З урахуванням природи неоднорідності розвитку деформацій в полікристалічних матеріалах на основі критеріїв [4] описано розосереджене тріщиноутворення, що передує виникненню магістральних тріщин.

Опис розвитку тріщин в довільних суцільних середовищах запропонований Черепановим Г. П., 1967 р [5]. Теорія базується на енергетичній концепції і на уявленні про надтонку структуру біля вершини тріщини. Теорія граничної рівноваги і теорія крихких тріщин складають основу сучасної механіки руйнування. На практиці міцність твердого тіла залежить від основних чинників: матеріалу, форми і розмірів тіла, часу, способу і числа циклів навантаження, температури, параметрів зовнішнього середовища, швидкості і передісторії деформування. Виявлено [6] зміну зазначених чинників, яка відокремлює область в'язкого руйнування від області крихкого руйнування. Міцність в'язкого руйнування визначається за теоріями міцності та граничної рівноваги [7].

У 1940 роках Г. І. Бабат та А. В. Варзін [7] описали поведінку діелектричних матеріалів в електромагнітних полях високої частоти між плоскими електродами на прикладі гірських порід. Визначено, що під електродами створюються електромагнітні поля, що утворюють температурні напруження. Для гірських порід це призводить до розколу і відколу шматків. Ефективність руйнування залежить від правильності узгодження параметрів коливального контуру генератора високої частоти з фізико-механічними властивостями ГП. Сформоване електромагнітне поле забезпечує руйнування матеріалу уздовж лінії розколу (спрямоване високочастотне руйнування). Недоліком дослідження є неврахування анізотропії, що не дозволяє узгодити параметри коливального контуру генератора високої частоти з фізико-механічними властивостями ГП. У 1961 – 1963 роках проведені експерименти високочастотного руйнування гірських порід В. С. Кравченком, А. П. Зразковим, В.

М. Семеновим [4]. Дослідження спрямованого високочастотного руйнування сприяли відкриттю явища високочастотного теплового пробою і електротермічного руйнування. Вони зв'язують фізико-механічні властивості матеріалів, що піддаються дробленню з параметрами поля. Дослідження в цьому напрямку проводили В. Д. Иц-Хакінен, А. П. Зразковий і В. В. Устинов [4] (1962-1964). Нерівномірність залягання і анізотропія гірських порід, змінність їх властивостей і залежність останніх від температури, напруженості поля і частоти зумовили одержання результатів із похибкою більше 15 %. У п'ятдесятих роках Г. І. Бабат та А. В. Варзін [4] визначили, що хвиля частотою 3 ГГц, падаюча на пісковик, викликає відкол його пластинок з поверхні. Глибина і розподіл потоку електромагнітної енергії в матеріалі залежать від довжини електромагнітних хвиль і електрофізичних властивостей матеріалу. Це призводить до відколу матеріалу - хвильового виламування. Експериментальне підтвердження цього на зразку граніту отримано В. С. Кравченко та А. П. Зразковим у 1965 р. [4]. Тепловий чинник є причиною руйнування не тільки у випадку впливу потоком тепла, але і в разі руйнування високочастотними хвилями. Хвильовий нагрів відбувається у всьому об'ємі, що пронизано електромагнітним потоком. При нагріванні тепло поширюється вглиб за рахунок теплопровідності із відповідними втратами. Недоліком є неврахування субрезонансної складової високочастотного руйнування ГП.

У 1970 роках Хорст Блюменауер [8] та Такео Екоборі [9] досліджували руйнування елементів твердого тіла внаслідок розвитку тріщин. Враховано вплив дефектів при аналізі напруженого стану конструктивних елементів. Встановлено зв'язок між номінальним напруженням, формою і розміром дефекту, та опором твердого тіла стабільному і нестабільному розвитку тріщин. В якості критерію нестабільного поширення тріщини після пластичної деформації Х. Блюменауером прийнята величина критичного розкриття тріщини в зоні біля вершини тріщини. Критичне розкриття тріщини пропорційне критичному коефіцієнту інтенсивності напруги плоско-напруженого стану [8]:

$$K_C = (\sigma_T \cdot \delta_C \cdot E)^{1/2}, \quad (1.1)$$

де K_C - критичний коефіцієнт інтенсивності, Па·м^{1/2};

σ_T – умовна границя текучості, Па;

δ_C – критичне розкриття тріщини, м;

E – модуль пружності І роду, Па.

Критичний розмір дефекту, що призводить до руйнування ГП, досягається при розвитку наявних тріщин. Хорст Блюменауер вперше застосував змінні навантаження для руйнування твердих тіл. Проте в роботі не врахована можливість активізації внутрішньої потенційної енергії кристалічних структур, а сконцентрована на подоланні енергії забороненої зони кристалічних структур [8].

Такео Екоборі [9] встановив наявність внутрішніх джерел енергії, які протидіють зовнішньому навантаженню. Він зазначає, що при досягненні деякої критичної величини прикладеної зовнішньої сили, в матеріалі виникає розподіл напружень, що призводить до утворення дислокацій. Розподіл напружень і розташування дислокацій є основними чинниками, що визначають напруження у вершинах природних тріщин ГП. Його теорія утворення дислокацій доповнює теорію пластичності, описуючи механізм виникнення та поширення тріщин за рахунок розподілу напружень.

У 70 – 80х роках Н. Н. Kausch [10], Рейгель [11], І. Narisava [12] та інші до основних чинників при руйнуванні відносять розмір анізотропних включень. Ці включення є осередками виникнення тріщин. У процесі механічного навантаження, енергія акумулюється в анізотропних включеннях ГП. Зміна енергії поля напруження у системі включень рівнозначна поверхневій енергії утворення тріщини [10]. У дослідженнях [10-12], внутрішня потенційна енергія представлена енергією кристалічної структури ГП. Вона визначається через зсув атомів з положення рівноваги, сили взаємодії між атомами і енергію вільних електронів, що дає можливість перейти від класичних до молекулярно-кінетичних теорій руйнування. Ці теорії визначають взаємодію кристалічних структур ГП, як сукупність сил

пластичності та пружності приймають сталими фізико-механічні константи середовища, яке руйнується. Основним чинником утворення тріщин в молекулярно-кінетичній теорії [12] є розрив ланцюгів кристалічних структур ГП. Розрив ланцюгів досягається деформацією аморфних областей та деформацією плоских прохідних монокристалічних ланцюгів. Їх деформація не враховується через малі значення (до мікрону), ніж у деформації аморфних областей, що на порядок вищі. Ікуо Нарісава деформацію аморфних областей визначає як [12]:

$$\varepsilon_A = \varepsilon / (1 - x), \quad (1.2)$$

де ε_A – деформація аморфних областей, м;

ε – макроскопічна деформація матеріалу, м;

x – коефіцієнт кристалічності, в. о.

Наведені вище дослідження [10-12] доповнюються зонною та квантова теоріями твердого тіла. Представники зонної теорії (Волькенштейн [13], Зейтц [14], Ястребов [15]) визначили, що при руйнуванні гірських порід необхідно подолати енергію забороненої зони кристалічних структур. У зонній теорії енергія електрона може приймати тільки дискретні значення, тобто електрон знаходиться на одній з орбіталей [14]. При руйнуванні ГП, необхідно враховувати хімічну формулу їх структур (наприклад за хімічною теорією зв'язку). В основі зонної теорії лежать наближення [15]:

- тверде тіло являє собою періодичний кристал;
- рівноважні положення вузлів кристалічної структури фіксовані, тобто ядра атомів вважаються нерухомими;
- коливання атомів навколо рівноважних положень, які можуть бути описані як фонони, вводяться згодом як збурення електронного енергетичного спектру;
- багатеелектронні структури розглядаються, як одноелектронні, вплив на даний електрон всіх інших описується усередненим періодичним полем.

Відповідно до зонної теорії, кожен електрон не взаємодіє з іншими електронами. Це спрощує розрахунок енергетичних зон для кристалічних структур. Проте, не враховуються сили ковалентних зв'язків при руйнуванні ГП. Розрахунок зонної структури конкретних напівпровідників ускладнений тому, що відсутній аналітичний вираз для періодичного потенціалу кристалу [15]. Тому при будь-яких розрахунках у формулах містяться параметри, значення яких визначаються на основі порівняння з експериментальними даними (ширина забороненої зони визначається тільки експериментально [13]). Основним недоліком зонної теорії є зведення систем електронів твердих тіл до одно електронних структур з усередненням значень.

Цю теорію доповнює квантова теорія поля (КТП). Квантова теорія поля на даний час є єдиною експериментально підтвердженою теорією, представниками якої є Е. Зі [16], І. П. Іпатова [17], Дж. Глім [18], та інші. Теорія описує поведінку елементарних частинок при енергіях, що істотно перевищують їх енергію спокою. Недоліком теорії є визначення енергії подолання зав'язків багато електронних структур ГП для їх руйнування замість активізації внутрішньої енергії і направлення її на руйнування.

У наведених вище теоріях руйнування ГП є спільні недоліки:

- прийняття сталими фізико-механічних констант кристалічних структур, які змінюються під впливом енергетичних джерел, що призводить до зміни міцнісних характеристик ГП;
- неврахування кристалічних структур, як внутрішніх джерел енергії, яку можна вивільнити з кристалу і направити для його руйнування;
- використання емпіричних фізико-механічних параметрів кристалічних структур замість функціональних, які змінюються в анізотропних ГП при впливі зовнішнього енергетичного джерела;
- неможливість переходу від молекулярних показників до показників кристалічних структур ГП, що унеможливорює активізацію внутрішньої енергії;
- неврахування впливу зовнішніх джерел енергії на фізико-механічні параметри кристалічних структур.

Використання комбінації принципів наведених теорій для аналізу руйнування кристалічних структур ГП дозволяє врахувати вплив зовнішніх та внутрішніх джерел енергії на кристалічні структури. При використанні теплового високочастотного пробою експериментально доведено [4], що нагрівання відбувається по всьому об'єму ГП, який знаходиться під впливом електромагнітного поля. Тому, раціонально використовувати електророзрядні технології у комбінації із класичними механічними способами для зниження енергоємності руйнування ГП. Застосування хімічної теорії зв'язку дозволяє оцінити енергетичний потенціал кристалічних структур ГП.

1.2 Домінантні умови і вибір способу руйнування

Для домінуючих умов руйнування, що задовольнятиме вимогам [19], запропоновано використовувати точні і ітераційні методи [20] лінійного програмування. Точні методи дозволяють отримати цілі результати, за умови використання цілих значень. Ітераційні, дозволяють отримати відносні значення з можливістю визначення похибки [20]. Так як у матриці вихідних даних застосовуються цілі числа, доцільно використовувати точні методи. Серед точних методів виділено метод Жордано-Гаусса. Він відрізняється від існуючих тим, що [21]:

- дає відповіді у випадку нульового визначника;
- обсяг результатів не зростає із збільшенням кількості рівнянь.

Метод Жордано-Гаусса відрізняється від методу Гаусса тим, що використовує не трикутну матрицю, а правило прямокутника, що скорочує час рішення та зменшує використання об'єму оперативної пам'яті комп'ютера [22]. Методика аналізу методом Жордано-Гаусса прийнята відповідно до [23].

До основних способів руйнування ГП відносять руйнування свердлами, молотами, шарошками, гідроструменем, електротермічними розрядами [24 -27].

Визначено основні умови руйнування породних ГП відповідно до [19]:

- x_1 – можливість примусового видалення зруйнованих частинок породи із зони руйнування;
- x_2 – стала продуктивності при збільшенні міцності породи;
- x_3 – вибірковість до зміни внутрішньої структури гірських порід;
- x_4 – можливість створення адаптованої до змінної структури гірських порід системи руйнування;
- x_5 – можливість виведення тонкодисперсних пилових частинок із зони руйнування;
- x_6 – можливість застосування сухого знепилення;
- x_7 – застосування гідрознепилення.

Умови руйнування породних гірських порід зведено до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Матриця вихідних даних

Спосіб руйнування гірських порід	Умова (A)							Сума (B)
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	
різанням (y_1)	1	0	0	1	1	1	1	5
шарошками (y_2)	1	0	0	1	1	1	1	5
ударне (y_3)	1	0	0	0	0	1	1	3
гідро (y_4)	0	0	0	0	1	0	1	2
електротермічне (y_5)	0	1	1	1	0	1	0	4

Систему у вигляді матриці і для зручності зведено до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Зведена матриця розрахунку Жордано-Гаусса

1(ДЕ)	0	0	1	1	1	1	5
1	0	0	1	1	1	1	5
1	0	0	0	0	1	1	3
0	0	0	0	1	0	1	2
0	1	1	1	0	1	0	4

де $\{1, 0, 0, 0, 0\}$ – головна діагональ матриці.

Послідовно, починаючи з першого елементу зверху до низу, обрано дозволяючий елемент ДЕ, який належить головній діагоналі матриці. $ДЕ=1$ Нижче по головній діагоналі отримані нулі. Всі інші елементи матриці, включаючи елементи стовпця В, визначено за правилом прямокутника [23]. Для цього обрано чотири числа, які розташовані у вершинах прямокутника і завжди включають ДЕ.

Елементи матриці, відповідно до [23], розділено на:

- зовнішній елемент $ЗЕ = СЕ - (А \cdot В) / ДЕ$;
- дозволяючий елемент – ДЕ;
- сумований елемент – $СЕ = y_i / ДЕ_i$
- елементи матриці – А і В.

Розрахунок та результати представлено у таблицях 1.3 та 1.4 відповідно.

Таблиця 1.3 – Розрахунок сумованих та зовнішніх елементів першого етапу

Еле-мент	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	В
СЕ	1/1 = 1	0/1 = 0	0/1 = 0	1/1 = 1	1/1 = 1	1/1 = 1	1/1 = 1	5/1 = 5
ЗЕ	$1 - \frac{1 \cdot 1}{1} = 0$	$0 - \frac{0 \cdot 1}{1} = 0$	$0 - \frac{0 \cdot 1}{1} = 0$	$1 - \frac{1 \cdot 1}{1} = 0$	$1 - \frac{1 \cdot 1}{1} = 0$	$1 - \frac{1 \cdot 1}{1} = 0$	$1 - \frac{1 \cdot 1}{1} = 0$	$5 - \frac{5 \cdot 1}{1} = 0$
	$1 - \frac{1 \cdot 1}{1} = 0$	$0 - \frac{0 \cdot 1}{1} = 0$	$0 - \frac{0 \cdot 1}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 1}{1} = -1$	$0 - \frac{1 \cdot 1}{1} = -1$	$1 - \frac{1 \cdot 1}{1} = 0$	$1 - \frac{1 \cdot 1}{1} = 0$	$3 - \frac{5 \cdot 1}{1} = -2$
	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$1 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 1$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$1 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 1$	$2 - \frac{5 \cdot 0}{1} = 2$
	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$1 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 1$	$1 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 1$	$1 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 1$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$1 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 1$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$4 - \frac{5 \cdot 0}{1} = 4$

Таблиця 1.4 – Другий етап розрахунку Жордано-Гаусса

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	В
1	0	0	1	1	1	1	5
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-1	-1	0	0	-2
0	0	0	0	1	0	1	2
0	1	1	1	0	1	0	4

Оскільки другий ДЕ дорівнює нулю, то змінено місцями рядки матриці, таблиця 1.5.

Таблиця 1.5 – Третій етап розрахунку Жордано-Гаусса

x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	B
1	0	0	1	1	1	1	5
0	1	1	1	0	1	0	4
0	0	0	-1	-1	0	0	-2
0	0	0	0	1	0	1	2
0	0	0	0	0	0	0	0

На місці ДЕ отримано 1, а в самому стовпці, відповідно методики, записуємо нулі. Всі інші елементи матриці, включаючи елементи стовпця В, визначаються за правилом прямокутника [20]. Для цього обрано чотири числа, які розташовані у вершинах прямокутника і завжди включають ДЕ. Розрахунок сумованих та зовнішніх елементів представлено у таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Розрахунок сумованих та зовнішніх елементів третього етапу

x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	B
$1 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 1$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$1 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 1$	$1 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 1$	$1 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 1$	$1 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 1$	$5 - \frac{4 \cdot 0}{1} = 5$
$0/1 = 0$	$1/1 = 1$	$1/1 = 1$	$1/1 = 1$	$0/1 = 0$	$1/1 = 1$	$0/1 = 0$	$4/1 = 4$
$0 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$-1 - \frac{1 \cdot 0}{1} = -1$	$-1 - \frac{0 \cdot 0}{1} = -1$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 0$	$-2 - \frac{4 \cdot 0}{1} = -2$
$0 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$1 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 1$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$1 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 1$	$2 - \frac{4 \cdot 0}{1} = 2$
$0 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{1 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{0 \cdot 0}{1} = 0$	$0 - \frac{4 \cdot 0}{1} = 0$

Результат розрахунків зведено до таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Результат розрахунку Жордано-Гаусса

Спосіб руйнування ГП	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	B
різанням (y ₁)	1	0	0	1	1	1	1	5
шарошками (y ₂)	0	1	1	1	0	1	0	4
ударне (y ₃)	0	0	0	-1	-1	0	0	-2
гідро (y ₄)	0	0	0	0	1	0	1	2
електротермічне (y ₅)	0	0	0	0	0	0	0	0

Вихідні умови:

$$x_i = B - 3E_{(i+1)j} + 3E_{(i+2)j} + \dots + 3E_{(i+(n-1))j}, \quad (1.3)$$

де i – кількість умов, в. о.;

j – кількість способів, в. о.

$$x_1 = 5 - x_4 + x_5 + x_6 + x_7, \quad (1.4)$$

$$x_2 = 4 - x_3 + x_4 + x_6, \quad (1.5)$$

$$x_3 = -2 + x_4 - x_5, \quad (1.6)$$

$$x_4 = 2 - x_5 + x_7, \quad (1.7)$$

$$x_5 = 0. \quad (1.8)$$

Змінні x_5 , x_6 , x_7 прийнято в якості вільних змінних і через них визначено інші змінні [23]. Змінні x_5 , x_6 , x_7 прирівняні до 0, змінні $x_1 = 5$, $x_2 = 4$. Серед базисних змінних немає негативних значень. Отже, дане рішення є базовим.

Методом Жордано-Гаусса, визначено, що домінантними умовами є:

- x_1 – можливість примусового видалення зруйнованих частинок породи із зони руйнування;
- x_2 – стала продуктивності при збільшенні міцності породи.

За цими умовами обрано способи руйнування породи різанням, шарошками та електротермічний. Тому, доцільним є використання комбінованих способів руйнування ГП: механічного (різцями, шарошками) із електротермічним.

1.3 Електротермічне руйнування

При електротермічному руйнуванні, на практиці використовують електродинамічну установку [28]. Руйнування ГП в електродинамічній установці відбувається енергією електричного імпульсу від конденсаторних батарей [28]. У цих установках електрогідравлічний ефект отримують вибухом провідників в рідині, що досягається розрядом електричної енергії через дрітжану перемичку між позитивними і негативними електродами, розташованими в технологічному вузлі. Основне завдання електричного підривання полягає в тому, щоб підвести до дроту можливо більшу кількість енергії в можливо більш короткий проміжок часу. Тому, основним недоліком наведених установок руйнування ГП є прямопропорційна залежність питомої енергоємності руйнування від споживаної потужності. Для накопичення енергії застосовують блок конденсаторів ємністю в кілька тисяч мікрофарад, що заряджають до напруги 1000 кВ [28]. Замикання ланцюга може здійснюватися через механічні розрядники або інший комутуючий пристрій типу імпульсного вимикача (наприклад, ігнітрон, час спрацювання якого складає кілька наносекунд), або через який можна пропустити струм силою в кілька тисяч ампер, що достатній для вибуху дроту. Відомі установки для кар'єрів з видобутку блоків облицювальних каменів: високочастотна контактна електротермічна «Електра» ІГС ім. О. О. Скочинського, що руйнує породи струмом промислової частоти з використанням установки УРН-400. Експерименти підтверджують, що на розкол блоку площею 0,8 м² витрачається 3 хв. при енергоємності процесу 3,6 кВт·год/м²

[28]. При цьому, відбувається нагрів тих мінералів, які можуть поглинати електромагнітну енергію. Це обумовлює «...велику витрату електроенергії, що стримує його практичне застосування» [28]. Існують також установки ультразвукові [28], що зводяться до накладання ультразвукових коливань з частотою 20 кГц на робочий інструмент. Під дією високочастотних коливань порода руйнується. Відповідно з дослідженнями С. М. Павлова [29], атоми твердих тіл роблять складні коливання біля положень рівноваги. Так як атомів у твердих породах безліч, розглядається їх колективний рух у кристалі, як у просторово упорядкованій системі. Цей підхід пояснюється дією сил зв'язку коливання. При наявності коливання у однієї частинки, воно передається сусіднім частинкам. В кристалі збуджується загальний рух у формі пружної хвилі, що охоплює всі частинки кристала. Такий загальний рух подається як сукупність синусоїдальних коливань ґратки.

При нагріванні, тверді тіла розширюються. Це викликає появу внутрішніх напружень в плівках, покриттях, адгезійних з'єднаннях. Причиною теплового розширення є несиметричний характер залежності енергії взаємодії частинок від відстані між ними. Це пояснюється тим, що частинки кристалу здійснюють не тільки гармонічні коливання. При гармонічних коливаннях, нагрівання не викликає розширення тіла, так як збільшується амплітуда коливання, а середня відстань між частинками не змінюється.

Недоліками високочастотних електроімпульсних способів руйнування є:

- пропорційна залежність питомої енергоємності руйнування від споживаної потужності установки;
- застосування ємнісних накопичувачів енергії, що зумовлює небезпеку вибуху та неекологічність процесу руйнування ГП.

При електротермічному руйнуванні застосовують різні види пробою [28-29]: низькочастотне руйнування; спосіб імпульсного пробою; високочастотний тепловий пробій; діелектричне і хвильове руйнування.

Залежно від передачі електричної енергії до породи розрізняють безконтактне та контактне руйнування. ГП, які мають у складі включення, що проводять струм,

руйнуються струмами промислової частоти. Недоліком є необхідність додаткових операцій пошуку струмопроводячих шарів. Одностороннє контактне руйнування відбувається за рахунок теплопровідності матеріалу, яка залежить від температури і напрямку щодо шаруватості гірських порід. Із збільшенням щільності матеріалу коефіцієнт теплопровідності гірських порід зростає, з підвищенням температури він зменшується, що сприяє руйнуванню гірської породи. Нагрівання структури гірських порід під дією електричного струму створює коливання кристалічних структур породи, що призводять до її руйнування. Для гірських порід – діелектриків частота нормальних коливань кристалічних структур 5,28 МГц [30]. Недоліком розігріву структур гірських порід електричним струмом є те, що тепловий пробій не викликають струми високої частоти. До переваг відноситься нерівномірний діелектричний нагрів матеріалу, що призводить до створення руйнівних напружень. Вони утворюються по всій глибині проникнення електричного поля. Його параметрами можна впливати на процеси, залежно від електричних властивостей породи. Гірські породи неоднорідні за складом, отже, руйнування їх відбувається при меншій напрузі, ніж однорідних діелектриків. При використанні імпульсного високовольтного пробою при напрузі 50 кВ, руйнувалися зразки бурого залізняку, кам'яного вугілля [30].

Недоліком відомих установок електротермічного руйнування є наявність ємнісного накопичувача. Продуктивність установки залежить від накопиченої енергії. Для підвищення продуктивності установки необхідно збільшувати ємність системи. Отже необхідно досліджувати систему, продуктивність якої залежить від параметрів живлячої мережі (напруга, частота), системи електротермічного впливу (індуктивність, заповнювач між електродного проміжку) та середовища, що руйнується (частота коливання кристалічної структури, міцність, хімічний склад).

Наведені характеристики має індуктивна плазма. Для подолання недоліків використання імпульсного та високочастотного руйнування ГП запропоновано використовувати електротермічне руйнування потоком індуктивної плазми, перевагами якого є [31]:

- відсутність ємнісних накопичувачів енергії, що забезпечує вибухобезпеку та екологічність процесу руйнування ГП;

- використання субрезонансної та теплової складових потоку індуктивної плазми для активізації внутрішніх джерел енергії кристалічних структур;

- можливе регулювання режиму роботи за рахунок зміни характеристики розрядного потоку. Це дозволяє підібрати режим руйнування для реальних анізотропних пластів ГП;

- відсутня спеціальна система запалювання;

- можливість регулювання процесом руйнування ГП за зворотнім зв'язком;

- відсутність системи подачі пального;

- відсутнє виділення шкідливих для здоров'я речовин.

Характерною особливістю електротермічного руйнування твердих тіл є вибірковість процесу [19]. Це забезпечує збереження природних форм порід, які руйнуються. До основних механізмів, що забезпечують направлене руйнування неоднорідних порід відносять:

- направлений рух потоку розряду в область розташування електрофізичних неоднорідностей. Вони визначаються розподілом максимальних напружень електромагнітного поля в структурі твердого тіла;

- взаємодія ударних хвиль та хвиль стиснення з акустичними неоднорідностями в матеріалі. Це визиває підвищення механічних напружень на границях дефектних зон, що веде до їх розповсюдження;

- направлений рух магістральних тріщин до дефектних зон.

Використання електротермічного руйнування дозволяє:

- створити передруйнівну зону ГП із зниженими міцнісними характеристиками;

- виключити втрати на тертя, як при механічних способах руйнування ГП;

- забезпечити дискретне регульоване руйнування, що усуває витрати енергії на подрібнення продуктів руйнування;

- концентрувати потужність електротермічного розряду голчастими розрядниками в точці на ГП.

За наведеними перевагами для подальшого дослідження обрано електротермічне руйнування гірських порід, рисунок 1.1.

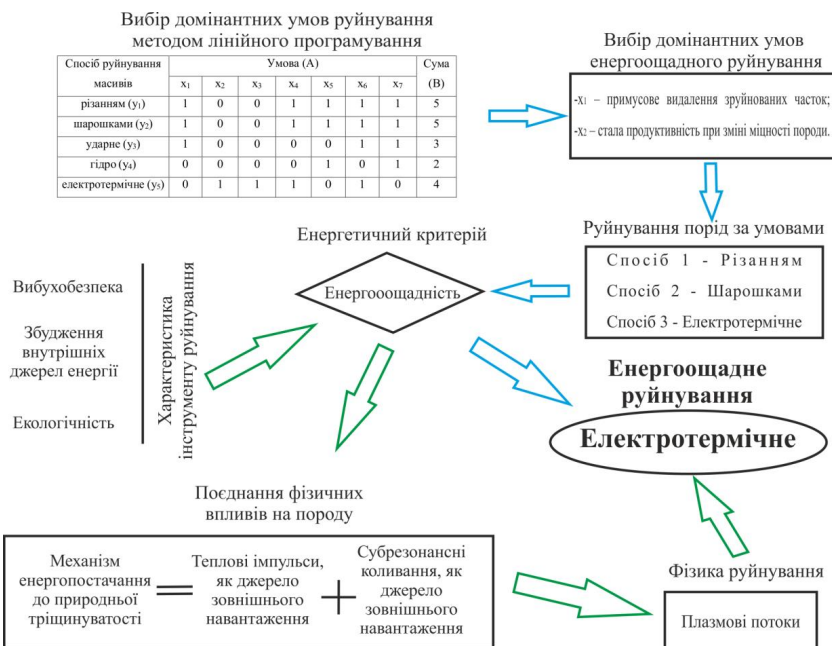


Рисунок 1.1 - Вибір енергоощадного руйнування ГП

Джерелом енергозабезпечення природної тріщинуватості запропонованої системи є субрезонансні коливання та теплові імпульси, які збуджуються у потоці індуктивної плазми. Вибір домінантних умов руйнування виконано методом лінійного програмування Жордано-Гаусса. Енергетичний критерій відсіяв неекономічні способи та матеріаловитратні інструменти руйнування гірських порід, а саме ударне та гідроруйнування.

Діаграмою Ейлера-Венна [32] визначено синтез властивостей плазмомеханічного руйнування гірських порід, рисунок 1.2. Плазмове руйнування відповідає за створення передруйнівної зони субрезонансною та температурною складовими потоку індуктивної плазми. Механічне виконує фактично руйнування ослабленої гірської породи.

Плазмо-механічним руйнуванням досягнуто:

- x_1 – можливість примусового видалення зруйнованих частинок породи із зони руйнування;
- x_2 – стала продуктивності при збільшенні міцності породи;
- x_4 – можливість створення адаптованої до змінної структури ГП системи руйнування;
- x_5 – можливість виведення тонкодисперсних пилових частинок із зони руйнування;
- x_6 – можливість застосування сухого знепилення;
- x_7 – застосування гідрознепилення.

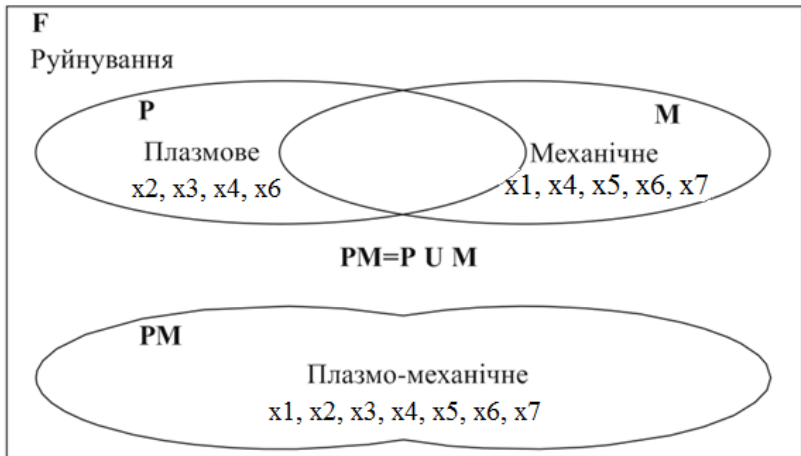


Рисунок 1.2 – Діаграма-Ейлера Венна властивостей плазмо-механічного руйнування

Створення передруйнівної зони плазмовим способом знеміцнює ГП для енергоощадного руйнування механічними навантаженнями.

Нижче виділено переваги та недоліки у дослідженнях електротермічного впливу на гірську породу. У [33] експериментально доведено зниження міцності норитів з 16 МПа до 6 МПа, гранітів з 11 МПа до 9 МПа, базальтів з 13 МПа до

8 МПа під впливом НВЧ розрядів із частотами від 0,3 ГГц до 3,0 ГГц. Зафіксовано лінійне зниження температурного впливу розряду зі збільшенням відстані між зразком і розрядником. Міцність на розрив та стиск зменшуються зі збільшенням часу впливу до 120 секунд і потужності до 5 кВт. Скануючі електронні мікрофотографії зафіксували розвиток тріщин під впливом НВЧ розрядів. Недоліком розглянутої роботи є використання електротермічного впливу після механічного руйнування. При цьому не використовується потенціал фізичних полів для передуючого механічному руйнуванню ослаблення.

У роботі [34] доведено ефективність використання електротермічного руйнування у комбінації із бурінням, що знижує енергоємність руйнування до 5...11 разів. При цьому, зменшено витратність бурових коронок через попереднє ослаблення гірських порід збільшенням температури та тиску на робочу поверхню. Недоліком є відсутність регулювання впливу енергетичного джерела в залежності від структури гірських порід.

У дослідженні [35] вивчався вплив температур (873 К, 1073 К і 1173 К) на механічні властивості твердих тіл. Було встановлено, що температура 1073 К підвищує мікротвердість і модуль пружності (до 0,05 МПа). Подальше збільшення температури до 1173 К не підвищує модуль пружності більше, ніж до 0,1 МПа. Це пов'язано із термічним руйнуванням твердих тіл по природнім дефектностям. При досягненні температури значення 1073 К, відношення дефектностей до загального об'єму твердого тіла знизився. Підвищення температури 1173 К не достатнє для руйнування міцних фракцій та зниження модулю пружності.

У роботі [36] запропоновано нове використання плазмового розряду для очищення води від іонів біокарбонату. Досягнуто зниження концентрації іонів біокарбонату з 778 частинок на мільйон до нуля використанням плазмової обробки пластової води. При цьому концентрація іонів кальцію 5000 частинок на мільйон залишилась сталою. Недоліком даного дослідження є недостатнє визначення впливу плазмового розряду на молекулярну структуру води.

Дослідження [37] встановило зміну фізичного стану гірської породи під час лазерного руйнування. Зафіксовано передачу тепла, теплове випромінювання і

миттєвий фазовий перехід гірської породи, яка після руйнування складалась із фаз SiO_2 і Fe_2O_3 . Недоліком розглянутого дослідження є неврахування енергії молекулярних зв'язків, яка може бути направлена на зниження енергоємності руйнування гірських порід.

У роботі [38] зафіксовано зниження енергоємності руйнування гірської породи електричними імпульсами з 2000 Дж/см^3 до 170 Дж/см^3 , зі збільшенням відстані між електродами від 30 мм до 200 мм. Це обумовлено довжиною розрядного каналу і збільшенням абсолютної глибини його проникнення в гірську породу. Недоліком проведеного дослідження є неврахування енергії молекулярних зв'язків, яка може бути направлена на зниження енергоємності руйнування гірських порід. Енергія молекулярних зв'язків розглянута як сила протидії зовнішньому енергетичному впливу.

Загальним недоліком існуючих установок електротермічного руйнування є невикористання енергії молекулярних зв'язків, яка може бути направлена на зниження енергоємності руйнування гірських порід. Тому, доцільним є подальший розвиток досліджень впливу плазмової складової на гірську породу передуючому механічному руйнуванню.

РОЗДІЛ 2

ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПЛАЗМО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

2.1 Планування експерименту в умовних змінних

Програму експерименту розроблено у відповідності до [32]. Досліджено зміну питомої енергоємності руйнування кристалічних структур ГП керованим електротермічним впливом потоками індуктивної плазми, розділ 3. В якості зразків для експериментальних досліджень прийнято гематит, кварц, кальцит, магнезит. Гематит є одним з основних рудних мінералів [43], тому ослаблення його структур потоками індуктивної плазми є актуальним. Кремій є другим за поширеністю елементом на Землі, що входить до кварцових структур [44]. Кальцит є одним з найрозповсюдженіших мінералів на Землі [45] Магнезит обрано через поширеність його використання у виробництві будівельних матеріалів, кераміки, скла тощо [46].

Аналіз результатів досліджень (альтернативна гіпотеза), таблиця 3.14, показав, що вони є статистично імовірними. У програмному комплексі Minitab 17 встановлено, що характер їх розподілу, є нормальним, рисунок 2.1.

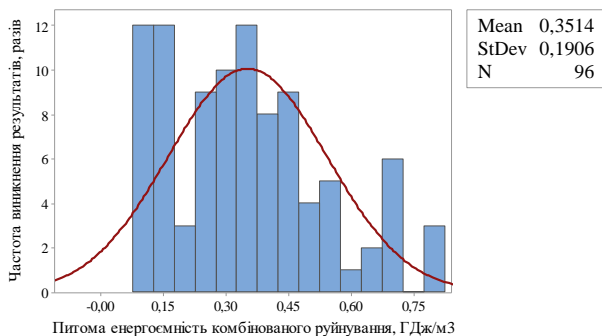


Рисунок 2.1 – Гістограма розподілу результатів альтернативної гіпотези, де Mean – мода, StDev – стандартна похибка, N – об’єм генеральної вибірки

Так як результати нормально розподілені, у комплексі Minitab 17 визначено імовірність того, що ці результати не залежать від сили струму та індуктивності – нульова гіпотеза, рисунок 2.2.

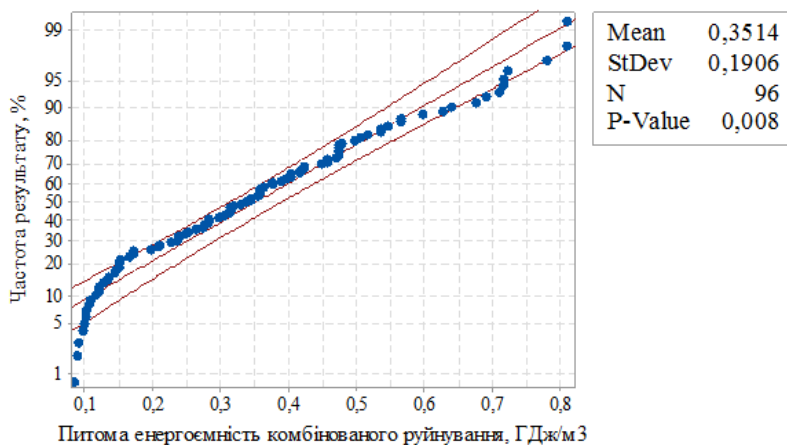


Рисунок 2.2 – Діаграма результатів альтернативної гіпотези із візуалізацією викидів з розподілу, довірча імовірність – 95 %, де P-Value – критерій імовірності

Визначено, що при наведеному характері викидів, імовірність отримання значень, що не відповідають розподілу, рівна 0,008 в.о., тобто 0,8 %. Альтернативна гіпотеза того, що сила струму та індуктивність впливають на питому енергоємність плазмо-механічного руйнування – приймається до планування.

Блок плазмового руйнування (БПР) планується до впровадження на підприємствах гірничої галузі. Тому, доцільним є визначення залежності питомої енергоємності руйнування обраних зразків від зміни технологічних параметрів БПР (сили струму та індуктивності).

На питому енергоємність руйнування A , кВт·год/т, при руйнуванні гірських порід плазовими потоками впливають наступні параметри:

- зразків (кристалічна структура, модуль пружності I роду, параметр кристалічних решіток);
- блоку плазмового руйнування (індуктивність та сила струму);

- потоків індуктивної плазми (радіус, температура, концентрація та частота власних коливань потоків плазми).

Основні вимоги до об'єкту дослідження – керованість (необхідно врахувати чинники об'єкту досліджень, що можна регулювати) та однозначність (чинники не повинні залежати один від одного). Цим вимогам відповідають наступні чинники, що обрані як головні: x_1 – кристалічна структура зразків; x_2 – сила струму блоку плазмового руйнування; x_3 – індуктивність блоку плазмового руйнування.

Експеримент можна проводити двома способами [47]. Перший – при спостереженні за некерованим процесом експериментальні точки обираються рандомізовано (пасивний експеримент). Недоліком його є неможливість керування технологічними параметрами під час руйнування ГП індуктивною плазмою (зміна напруги живлення, індуктивності системи, відстань між розрядниками). Другий спосіб – продуктивний – експеримент із застосуванням статистичних методів на всіх етапах дослідження: перед постановкою дослідів, при розробці схеми експерименту, у процесі експериментування, при обробці результатів і після експерименту (активний експеримент із плануванням) [47]. Для активного експерименту проведено його планування та складено матрицю. Відповідно до [46], визначення коефіцієнтів матриці планування поставлені наступним чином:

- для кожного з обраних чинників, що досліджується, обрано умовний нульовий рівень $0x_i$ довільно, за методикою [32]. При виборі умовного нульового рівня кристалічної структури прийнята до уваги їх поширеність [43-46]. Зміна кристалічних структур ГП $\in 0x_1 = \text{var}$. Сила струму – $0x_2 = 9 \text{ А}$, що є середнім значенням високочастотних електротермічних установок руйнування ГП [28, 30]; індуктивність – $0x_3 = 23,84 \text{ мкГн}$, що зумовлено заміною ємнісних елементів на індуктивні в БПР;

- для чинників обрано одиниці варіювання λ_i – величини, на які у даному досліді можна змінювати кожен чинник у бік збільшення або зменшення значення відносно нульового рівня (не менше 10 %): λ_1 – кристалічна структура, в. о., $\lambda_2 = 1 \text{ А}$, $\lambda_3 = 11,92 \text{ мкГн}$. Далі, рівні $0x_i - \lambda_i$ та $0x_i + \lambda_i$ позначаються відповідно символами «-» та «+»;

- складено матрицю планування експерименту в умовних змінних, таблиця 2.1.

Матрицю планування складають за допомогою планів першого та другого порядків [32]. Недоліком планів першого порядку є врахування тільки лінійних ефектів чинників і їх взаємодії. При знаходженні чинників на різних рівнях (не впливають один на інший), необхідний план вищого порядку. Ортогональний план враховує можливу нелінійність. При варіюванні чинника на трьох рівнях, повночинниковий експеримент містить занадто велику кількість дослідів (сотні) [32]. Тому, повночинниковий експеримент (ПЧЕ) для планів другого порядку є недоцільним. Використання плану другого порядку із ортогональним центральним композиційним плануванням (ОЦКП) дозволило провести планування із фіксованою кількістю дослідів (десятки) [32]:

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i, u=1 \\ i \neq u}}^k b_{iu} x_i x_u + \dots, \quad (2.1)$$

де b_i - коефіцієнти рівняння регресії, в. о.;

i, j, u – координати поверхні, в. о.;

x_i – чинники, в. о.;

k – кількість одиниць варіювання, в. о.

Знаходження рівняння регресії методом планування експериментів проведено за наступними етапами [47]:

- вибір основних чинників і їх рівнянь;
- моделювання експерименту;
- визначення коефіцієнтів рівняння регресії;
- статистичний аналіз результатів експерименту.

До ОЦКП входять: ядро - план ПЧЕ з $N_0 = 2 \cdot n$ точками плану, n_0 (одна для цього плану) центральна точка плану ($x_i = 0, i = 1, 2, 3$) і по дві "зіркові" точки для кожного чинника $x_i = \pm \alpha, x_j = 0, i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3, i \neq j, \alpha$ – плече «зіркової» точки.

В таблиці 2.1 наведено планування дослідження системи БПР в умовних змінних [32].

Таблиця 2.1 - Матриця планування експерименту в умовних змінних

Точки	U	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	$x_1 = x_4 = x_1^2 - a$	$x_2 = x_5 = x_2^2 - a$	$x_3 = x_6 = x_3^2 - a$	Y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Точки плану ПЧЕ 2 ^а	1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	1 - a	1 - a	1 - a	Y ₁
	2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	1 - a	1 - a	1 - a	Y ₂
	3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	1 - a	1 - a	1 - a	Y ₃
	4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	1 - a	1 - a	1 - a	Y ₄
	5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1 - a	1 - a	1 - a	Y ₅
	6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	1 - a	1 - a	1 - a	Y ₆
	7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	1 - a	1 - a	1 - a	Y ₇
	8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1 - a	1 - a	1 - a	Y ₈
Зіркові точки 2-п	9	+1	-a	0	0	0	0	0	0	$a^2 - a$	-a	-a	Y ₉
	10	+1	+a	0	0	0	0	0	0	$a^2 - a$	-a	-a	Y ₁₀
	11	+1	0	-a	0	0	0	0	0	-a	$a^2 - a$	-a	Y ₁₁
	12	+1	0	+a	0	0	0	0	0	-a	$a^2 - a$	-a	Y ₁₂
	13	+1	0	0	-a	0	0	0	0	-a	-a	$a^2 - a$	Y ₁₃
	14	+1	0	0	+a	0	0	0	0	-a	-a	$a^2 - a$	Y ₁₄
Нульова точка	15	+1	0	0	0	0	0	0	0	-a	-a	-a	Y ₁₅
$\sum_{U=1}^N x_{iU}$	-	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$\sum_{U=1}^N x_{iU}^2$	-	N	-			-			-				

При трьох чинниках модель функції відгуку [32]:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2. \quad (2.2)$$

В кожній площині, що містить вісь Y та координатну вісь i -того чинника (що проходить через центр плану), виявлено три значення чинника x_i і три відповідних значення Y .

Методика планування ОЦКП проводиться відповідно до [32]. При числі чинників $n = 3$, параметри плану:

- загальна кількість точок у плані ОЦКП:

$$N = 2^n + 2 \cdot n + n_0 = 8 + 2 \cdot 3 + 1 = 15. \quad (2.3)$$

Так як досліджується чотири типи кристалічних структур, то

- загальна кількість точок у плані ОЦКП:

$$N = 2^n + 2^{n-1} + 2 \cdot n + n - n_0 = 8 + 4 + 6 + 2 = 20. \quad (2.4)$$

За нульову точку прийнято перше зареєстроване приладами значення [32].

- константа перетворення a , в. о.:

$$a = \sqrt{2^n / (2^n + 2^{n-1} + 2 \cdot n + n - n_0)} = \sqrt{2^3 / (2^3 + 2^2 + 2 \cdot 3 + 2 - 1)} = 0,63. \quad (2.5)$$

- плече зіркових точок, α , в. о.:

$$\alpha = \sqrt{(\sqrt{N \cdot N_0} - N_0) / 2} = \sqrt{(\sqrt{20 \cdot 8} - 8) / 2} = 1,524. \quad (2.6)$$

Підставивши параметри плану до матриці планування, отримано план досліджень в умовних змінних, таблиця 2.2.

Таблиця 2.2 - План досліджень в умовних змінних

Точки	U	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	$x_1^2 = x_4 = x_1^2 - a$	$x_2^2 = x_5 = x_2^2 - a$	$x_3^2 = x_6 = x_3^2 - a$	Y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Точки плану ПЧЕ 2 ⁿ	1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₁
	2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₂
	3	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₃
	4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₄
	5	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₅
	6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₆
	7	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₇
	8	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₈
	9	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₉
	10	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₁₀
	11	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₁₁
	12	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,37	+0,37	+0,37	Y ₁₂
Зіркові точки 2 ⁿ	13	+1	-1,524	0	0	0	0	0	0	1,69	0,63	0,63	Y ₁₃
	14	+1	+1,524	0	0	0	0	0	0	1,69	0,63	0,63	Y ₁₄
	15	+1	0	-1,524	0	0	0	0	0	0,63	1,69	0,63	Y ₁₅
	16	+1	0	+1,524	0	0	0	0	0	0,63	1,69	0,63	Y ₁₆
	17	+1	0	0	-1,524	0	0	0	0	0,63	0,63	1,69	Y ₁₇
	18	+1	0	0	+1,524	0	0	0	0	0,63	0,63	1,69	Y ₁₈
	19	+1	-1,524	-1,524	-1,524	+2,32	+2,32	+2,32	-3,53	1,69	1,69	1,69	Y ₁₉
	20	+1	+1,524	+1,524	+1,524	+2,32	+2,32	+2,32	+3,53	1,69	1,69	1,69	Y ₂₀
$\sum_{U=1}^N x_i U$	-	20	+12	0	0	+10,64	+10,64	+10,64	+6	7,61	7,61	7,61	
$\sum_{U=1}^N x_i^2 U$	-	20	+37,935			+105,215				44,914			

Для проведення дослідження руйнування установкою БПР, визначено коефіцієнти поліномів та значення дисперсій (2.9) – (2.15).

2.2 Планування експерименту в явному вигляді

Для оцінки дисперсії спостережень в кожній i -ій точці чинникового простору проводять v дослідів. У результаті отримують значення $Y^{i1}, Y^{i2}, \dots, Y^{iv}$ досліджуваного параметра, для яких знаходять середнє значення [49]:

$$\bar{Y}^i = Y^{i1} + Y^{i2} + \dots + Y^{iv} / v, i = \overline{1, n}. \quad (2.7)$$

При проведенні експерименту, досліди в одній точці чинникового простору проводять не підряд. Їх обходять в першій, другій, ..., v -ій серії дослідів. Для зменшення впливу зовнішнього середовища і неконтрольованих чинників, всередині кожної серії, точки чинникового простору введено випадковим чином – рандомізовано послідовність дослідів [49]. Обрано рівні та інтервали варіювання головних чинників (кристалічна структура, сила струму та індуктивність) і зведено до таблиці 2.3. Рандомізацію дослідів проведено за допомогою генератора випадкових чисел, таблиця 2.4

Таблиця 2.3 – Рівні та інтервали варіювання чинників

Чинник	Рівні			Інтервал варіювання	x_1 – кристалічна структура
	Нижній (-1)	Нульовий (0)	Верхній (+1)		
x_2 – сила струму, А	8	9	10	1	гематит
x_3 – індуктивність, мГн	11,92	23,84	35,76	11,92	
x_2 – сила струму, А	8	9	10	1	кварц
x_3 – індуктивність, мГн	11,92	23,84	35,76	11,92	
x_2 – сила струму, А	8	9	10	1	кальцит
x_3 – індуктивність, мГн	11,92	23,84	35,76	11,92	
x_2 – сила струму, А	8	9	10	1	магнетит
x_3 – індуктивність, мГн	11,92	23,84	35,76	11,92	

Матриця планування експерименту в явному вигляді зведена до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Матриця планування експерименту в явному вигляді

Порядок проведення дослідження	№ дослідження	x ₀	Планування		
			x ₁	x ₂	x ₃
			Кристалічна структура	Сила струму, А	Індуктивність, мкГн
1	2	3	4	5	6
1й блок					
1	6	+1	Гематит	8	11,92
2	13	+1		9	11,92
3	3	+1		10	11,92
4	20	+1		8	23,84
5	12	+1		8	35,76
2й блок					
6	15	+1	Кварц	8	11,92
7	5	+1		9	11,92
8	9	+1		10	11,92
9	2	+1		8	23,84
10	16	+1		8	35,76
3й блок					
11	19	+1	Кальцит	8	11,92
12	4	+1		9	11,92
13	14	+1		10	11,92
14	1	+1		8	23,84
15	10	+1		8	35,76
4й блок					
16	11	+1	Магнетит	8	11,92
17	7	+1		9	11,92
18	17	+1		10	11,92
19	8	+1		8	23,84
20	18	+1		8	35,76

У відповідності до матриці планування, досліджено залежність питомої енергоемності руйнування A (ГДж/м³) руйнування потоками індуктивної плазми в залежності від сили струму I (А) та індуктивності L (мкГн) для кристалічних структур гематиту, кварцу, кальциту та магнезиту: $A=f(I, L)$.

За результатами проведення дослідів отримано дві залежності для чотирьох кристалічних структур ($A=f(I)$, $A=f(L)$), відповідно до таблиці 2.4.

По результатам плану сформовано поліном [49]:

$$\hat{Y} = b_0' + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_4 \cdot (x_1^2 - a) + b_5 \cdot (x_2^2 - a) + b_6 \cdot (x_3^2 - a), \quad (2.8)$$

де

$$b_0' = b_0 - b_4 \cdot a + b_5 \cdot a - b_6 \cdot a. \quad (2.9)$$

Коефіцієнти поліному [49]:

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^n x_{iU} \cdot y_i}{\sum_{U=1}^n x_{iU}^2}, \quad (2.10)$$

$$b_{iU} = \frac{\sum_{U=1}^n (x_{iU} \cdot x_{jU}) \cdot y_j}{\sum_{U=1}^n (x_{iU} \cdot x_{jU})^2}, \quad (2.11)$$

$$b_{iUj} = \frac{\sum_{U=1}^n (x_{iU} \cdot x_{jU} \cdot x_{aU}) \cdot y_j}{\sum_{U=1}^n (x_{iU} \cdot x_{jU} \cdot x_{aU})^2}, \quad (2.12)$$

де i, j - номер строки та стовпця в матриці планування, відповідно, в. о.;

U - номер строки, в. о.

Коефіцієнти поліному b визначено незалежно один від іншого. Суми в знаменниках різні для лінійних та квадратичних ефектів і взаємодій. Значення коефіцієнтів поліному зведені до таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Коефіцієнти поліному

Коефіцієнти поліному							
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
4.153	-0.3	-2.407	0.451	-0.259	1.531	0.801	-2.154

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії [49]:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_{\text{восп}}^2}{\sum_{U=1}^n x_{ij}^2}, \quad (2.13)$$

$$S_{b_{ii}}'^2 = \frac{S_{\text{восп}}^2}{\sum_{U=1}^n x_{iU}'^2}, \quad (2.14)$$

$$S_{b_j}^2 = \frac{S_{\text{восп}}^2}{\sum_{U=1}^n (x_{iU} \cdot x_{jU})^2}. \quad (2.15)$$

Значення дисперсій коефіцієнтів рівняння регресії зведені до таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії							
S_0	S_1	S_2	S_3	S_{12}	S_{13}	S_{23}	S_{123}
1.072	0.091	0.727	0.136	0.091	0.541	0.283	0.761

При варіюванні технологічних чинників – сили струму та індуктивності, кристалічна структура зразків, що руйнуються, зазнає змін. Не відбувається сталого у часі руйнування одного зразка. Із зміною кристалічної структури, змінюються умови і залежності її руйнування.

Для перевірки адекватності моделі використано критерій Кохрена [50]. Коефіцієнт значущий, якщо $G > G_{\text{табл}}$. Для 20ти дослідів та 3х чинників, $G_{\text{табл}} = 0,276$ в. о. [50]. Відношення максимальної дисперсії до суми дисперсій $G = 1,072/3,702 = 0,289$ в. о. Рівняння значимо, так як $G = 0,289 > G_{\text{табл}} = 0,276$ в. о.

Рівняння регресії:

$$\begin{aligned} y = & 2,293 - 0,3 \cdot x_1 - 2,407 \cdot x_2 + 0,451 \cdot x_3 - 0,259 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ & + 1,531 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,801 \cdot x_2 \cdot x_3 - 2,154 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,3 \cdot (x_1^2 - 0,73) - \\ & - 2,407 \cdot (x_2^2 - 0,73) + 0,451 \cdot (x_3^2 - 0,73) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Визначено, що головні чинники впливу на питому енергоємність руйнування кристалічних структур взаємопов'язані. У процесі руйнування кристалічних структур потоками індуктивної плазми, їх параметри змінюються нелінійно у часі і просторі. Для встановлення апріорної невизначеності розраховано ентропію результатів.

Максимально допустиме розсіювання [51] H_{max} , в. о.:

$$H_{\text{max}} = \log(n_S), \quad (2.18)$$

де n_S - кількість дисперсій коефіцієнтів рівняння регресії, в. о.

Ентропія теоретична [51] H , в. о.:

$$H = - \sum_{i=1}^n S_i \log(S_i). \quad (2.19)$$

Встановлено, що прогнозоване розсіювання результатів знаходиться у допустимих межах [51], так як $0,903 \text{ в. о.} > 0,765 \text{ в. о.}$ і $H_{\text{MAX}} > H$.

Відповідно, за критерієм Кохрена і виконанням умови ентропії, модель є раціональною. За методикою планування експерименту в електромеханіці, при визначенні моделі раціональною, оптимізація не виконується [32].

2.3 Стенд досліджень руйнування гірських порід

Для проведення експерименту, створено стенд експериментальних досліджень руйнування ГП. Стенд, рисунок 2.3, має наступні переваги:

- використання змінного струму не передбачає застосування випрямлячів;
- можливість використання постійної напруги на виході, за необхідності;
- можливість варіювання рівнів напруги, шляхом зміни відстані між розрядниками для зміни пробивної напруги;
- за звуком пробивання дуги визначається працездатність контуру схеми.

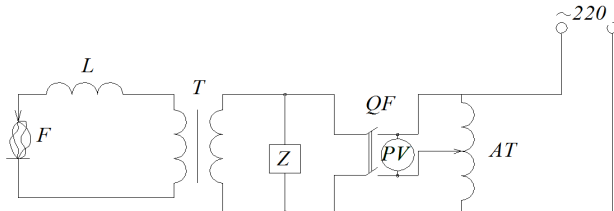


Рисунок 2.3 – Електрична схема стенду експериментальних досліджень БПР, де F – розрядник; L – котушка індуктивності; T – високовольтний трансформатор; Z – фільтр; QF – вимикач; PV – вольтметр; AT – автотрансформатор

Від мережі 220 В живиться автотрансформатор AT, вихідна напруга якого регулюється від 0 до 127 В. Фільтр Z згладжує синусоїду напруги і забезпечує плавність пуску та надійність роботи високовольтного трансформатора T. Високовольтний трансформатор налаштований на коефіцієнт перетворення 1181 в.о. – максимальне значення регулювання напруги автотрансформатором. Підвищена напруга через дросель L, що слугує для накопичення енергетичного потенціалу,

пробиває по розрядникам F повітряний проміжок. Утворюється коливальний контур. Кожна з трьох котушок індуктивності складається з 2217 витків мідного емаледроту виток до витку, діаметром 0,455 мм [48].

Для безпеки обслуговуючого персоналу, експериментальний стенд знаходиться у клітці Фарадея (заземлена сітка, що перешкоджає доступу до установки). Для запобігання нещасних випадків, корпус високовольтного трансформатора заземлений.

На рисунку 2.4 наведено блок-схему стенду експериментальних досліджень БПР. В блок-схемі блоки поділені на три групи:

- першої групи – блоки прямої взаємодії. Енергія від джерела перетворюється у контурах експериментального стенду та впливає на середовище, що руйнується (зразки структури ГП);
- другої групи – блоки зворотного зв'язку – датчики, вибір яких у розділі 4;
- третьої групи – блоки регулювання параметрів схеми експериментальних досліджень (зміна струму та індуктивності, зміна зразка структури ГП).



Рисунок 2.4 – Блок-схема стенду експериментальних досліджень БПР

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАЗМО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

3.1. Параметри потоку індуктивної плазми

Моделювання проведено математичним та експериментальним методами. Для коригування нелінійного математичного моделювання, проведено експериментальне. Значення сили струму (8 А – 10 А) та індуктивності (11,92 мкГн – 36,76 мкГн) БПР за матрицею планування (розділ 2) використано, як базові параметри коригуючих функцій двокомпонентної системи.

Розглянуто руйнування кристалічних структур ГП. Коливання кристалічної структури обумовлюються наявністю внутрішніх чинників (внутрішня енергія структури, швидкість розповсюдження хвилі, маса елементарної частинки тощо) та зовнішніх (концентрація і температури потоку плазми, час впливу на кристалічну структуру тощо). Їх регулювання на експериментальному стенді реалізовано зміною індуктивності та сили струму. Енергія потоку плазми обумовлена параметрами [59, 60]: частота власних коливань та концентрація. Ці параметри залежать від температури потоку плазми, $T_{пл}$, К [57]:

$$T_{пл} = \sqrt[4]{\pi \cdot \sigma_c^{-1} \cdot q_{mk}}, \quad (3.1)$$

де $\pi = 3,14$ – Лудольфове число (число Пі), в. о. [58];

$\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – постійна Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴) [58];

q_{mk} – максимальна інтенсивність потоку плазми, Вт/м² [57]:

$$q_{mk} = \delta_m \cdot U_a, \quad (3.2)$$

де δ_m – максимальна щільність струму, А/м²;

U_a – напруга розрядного контуру, В.

Максимальна щільність струму δ_m , А/м² [57]:

$$\delta_m = I_m / (\pi \cdot r_m^2), \quad (3.3)$$

де I_m – сила струму, А;

r_m – максимальний радіус потоку плазми, м [57]:

$$r_m = 0,093 \cdot (I_m)^{1/3} \cdot (t_m)^{1/2}, \quad (3.4)$$

де t_m – час першої напівхвилі затухаючого струму, с.

Підставивши (3.2) – (3.4) в (3.1), температура плазми:

$$T_{пл} = 4 \sqrt{\frac{I_m \cdot U_a}{\sigma_c \cdot (0,093 \cdot (I_m)^{1/3} \cdot (t_m)^{1/2})^2}}. \quad (3.5)$$

Врахувавши (3.28) та (3.36), сила струму БПР, I_m , А:

$$I_m = \sqrt{\frac{2 \cdot U - C_M \cdot U_a^2}{L}}, \quad (3.6)$$

де U – енергія електрична, Дж;

C_M – ємність міжвиткова, Ф;

L – індуктивність, Гн.

Сила струму та індуктивність визначені експериментально, таблиця 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри експериментального стенду з температурною залежністю потоку плазми

Сила струму, I_m , А	Час першої напівхвилі затухаючого струму, t_m , мс	Джерело	Температура плазми, $T_{пл}$, К
8	5	Визначено експериментально	7557
9			8446
10			9141
Індуктивність, L , мкГн	Час першої напівхвилі затухаючого струму, t_m , мс	Джерело	Температура плазми, $T_{пл}$, К
11,92	5	Визначено експериментально	2006
23,84			1823
35,76			1860

При збільшенні сили струму з 8 А до 10 А, елементарні частинки потоку плазми отримують надлишкову енергію. Це призводить до частіших зіткнень між ними, і температура потоку плазми лінійно зростає з 7557 К до 9141 К. При збільшенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, температура потоку плазми нелінійно знижується з 2006 К до 1860 К. Це пояснюється збільшенням реактивного опору, що затримує розрядний імпульс. Енергетичний потенціал системи знижується з 0,269 ПДж до 0,089 ПДж, рисунок 3.1.

За значеннями температури визначена концентрація потоку плазми, $N_{пл}$, m^{-3} [59]:

$$N_{пл} = p / (k \cdot T_{пл}), \quad (3.7)$$

де $p = 103307,5$ – тиск оточуючого середовища, Па [58];

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постійна Больцмана, Дж/К [58];

Кругова частота власних коливань потоку плазми, $\omega_{пл}$, s^{-1} [60]:

$$\omega_{пл} = \sqrt{4 \cdot \pi \cdot N_{пл} \cdot e^2 / m}, \quad (3.8)$$

де $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ – заряд електрона, Кл [58];

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ – маса електрона, кг [58].

Залежність концентрації потоку плазми та зміна кругової частоти власних коливань від температури потоку плазми зведена до таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Залежність концентрації потоку плазми від її температури та зміни кругової частоти власних коливань потоку плазми

Сила струму, I_m , А	Концентрація потоку плазми, $N_{пл}, \text{м}^{-3}$	Температура потоку плазми, $T_{пл}, \text{К}$	Кругова частота власних коливань потоку плазми, $\omega_{пл} \cdot 10^9, \text{с}^{-1}$
8	$9,905 \cdot 10^{23}$	7557	0,591
9	$8,862 \cdot 10^{23}$	8446	0,559
10	$8,189 \cdot 10^{23}$	9141	0,537
Індуктивність, L , мкГн	Концентрація потоку плазми, $N_{пл}, \text{м}^{-3}$	Температура потоку плазми, $T_{пл}, \text{К}$	Кругова частота власних коливань потоку плазми, $\omega_{пл} \cdot 10^9, \text{с}^{-1}$
11,92	$3,730 \cdot 10^{23}$	2006	0,629
23,84	$4,106 \cdot 10^{23}$	1823	0,380
35,76	$3,955 \cdot 10^{23}$	1860	0,374

При збільшенні температури з 7557 К до 9141 К, елементарні частинки, через зростання внутрішньої енергії в потоці плазми, частіше зіткаються. Частина їх розсіюється у навколишнє середовище. Концентрація потоку плазми лінійно знижується з $9,905 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ до $8,189 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Через накопичення внутрішньої енергії потоком плазми, кругова частота його власних коливань зростає з $0,537 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ до $0,591 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ і лінійно залежить від температури потоку плазми. При збільшенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, через збільшення реактивного опору, температура потоку плазми нелінійно знижується з 2006 К до 1860 К. Кругова частота власних коливань пропорційно температурі спадає з $0,629 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ до $0,374 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ через затримку розрядного імпульсу і зниження енергетичного потенціалу системи з 0,269 ПДж до 0,089 ПДж, рисунок 3.1.

Внутрішня енергія потоку плазми, U , Дж [61]:

$$U = \frac{r_m^4 \cdot \pi \cdot \rho_0 \cdot (r+l) \cdot N_{\text{пл}} \cdot V}{2 \cdot (\gamma-1) \cdot \pi^2 \cdot L \cdot C}, \quad (3.9)$$

де ρ_0 – щільність незбудженого розрядного середовища, кг/м^3 ;

$\gamma = 1,26$ – ефективний показник адіабати потоку плазми, в. о. [62];

L – індуктивність, Гн;

C – ємність розрядного контуру, Ф;

l – довжина потоку плазми, м;

r – радіус зони ефективної дії хвилі стиснення, м;

$V = \pi \cdot r^2 \cdot l$ [63] – об'єм потоку плазми, м^3 .

Недоліком (3.9) є неврахування коливань елементарних частинок потоку плазми, як внутрішнього джерела енергії. Лудольфове число описує не енергетичні а геометричні властивості. У роботі розглядається руйнування ГП, як системи коливального контуру із внутрішнім джерелом енергії. У (3.9) не враховано вплив енергії і кругової частоти внутрішніх коливань потоку індуктивної плазми. Для врахування наведених недоліків при переході до основного показника квантової механіки - постійної Планка, використана постійна Дірака [62]:

$$h = \hbar \cdot 2\pi, \quad (3.10)$$

де $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ – постійна Планка, Дж·с [58];

$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ – постійна Дірака, Дж·с [64].

Підставивши (3.10) у (3.9), енергія потоку плазми, U , Дж:

$$U = \frac{r_m^4 \cdot \pi \cdot \rho_0 \cdot (r+l) \cdot N_{\text{пл}} \cdot V}{2 \cdot (\gamma-1) \cdot (h/2 \cdot \hbar) \cdot L \cdot C}. \quad (3.11)$$

У розрядному контурі відсутня ємність, що є конструктивною особливістю [54] для збільшення вибухобезпеки та екологічності (відсутність конденсаторів). Ємність виражено через силу струму та напругу [65]:

$$\left(C \cdot U_a^2 \right) / 2 = W_{\text{э}} = U_a \cdot Q = U_a \cdot I_m \cdot t. \quad (3.12)$$

Відповідно до (3.12), ємність C розрядного контуру, Ф:

$$C = (2 \cdot I_m \cdot t) / U_a. \quad (3.13)$$

Підставивши (3.12) до (3.11), енергія потоку плазми, U , Дж:

$$U = \frac{r_m^4 \cdot \rho_0 \cdot (r+l) \cdot N_{\text{пл}} \cdot V \cdot U_a}{4 \cdot (\gamma-1) \cdot (h/2 \cdot \hbar) \cdot L \cdot I_m \cdot t}. \quad (3.14)$$

В (3.14) виконано поєднання законів квантової механіки із законами класичної теорії руйнування та параметрами експериментального стенду. За моделлю Ейнштейна, енергія елементарної частинки потоку індуктивної плазми, ε , Дж [66]:

$$\varepsilon = \omega_{\text{пл}} \cdot \hbar. \quad (3.15)$$

Результати за (3.15) у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Енергія елементарної частинки потоку плазми

Кругова частота власних коливань елементарної частинки потоку плазми, $\omega_{\text{пл}} \cdot 10^9, \text{с}^{-1}$	Енергія елементарної частинки потоку плазми, $\varepsilon \cdot 10^{-26}, \text{Дж}$
0,914	6,23
0,629	5,89
0,594	5,66
0,537	5,48
0,380	5,34
0,374	5,22

При збільшенні кругової частоти власних коливань елементарної частинки потоку плазми з $0,374 \cdot 10^9 \text{с}^{-1}$ до $0,914 \cdot 10^9 \text{с}^{-1}$ частішає кількість їх співударів. Енергетичний потенціал елементарної частинки потоку плазми пропорційно зростає з $5,22 \cdot 10^{-26} \text{Дж}$ до $6,23 \cdot 10^{-26} \text{Дж}$ через передачу кінетичної енергії при співударах.

Підставивши (3.15) у (3.14), енергія потоку плазми, U , Дж:

$$U = \frac{r_m^4 \cdot \rho_0 \cdot N_{\text{пл}} \cdot V \cdot \varepsilon \cdot (r+1) \cdot U_a}{2 \cdot (\gamma-1) \cdot h \cdot \omega_{\text{пл}} \cdot L \cdot I_m \cdot t} \quad (3.16)$$

Вперше запропонована математична модель енергії потоку плазми відрізняється від відомих тим, що встановлює її залежність від параметрів БПР (індуктивність та сила струму), рисунок 3.1. Енергетичний потенціал потоку індуктивної плазми враховано введенням його показників (концентрація, енергія та частота власних коливань елементарних частинок потоку плазми).

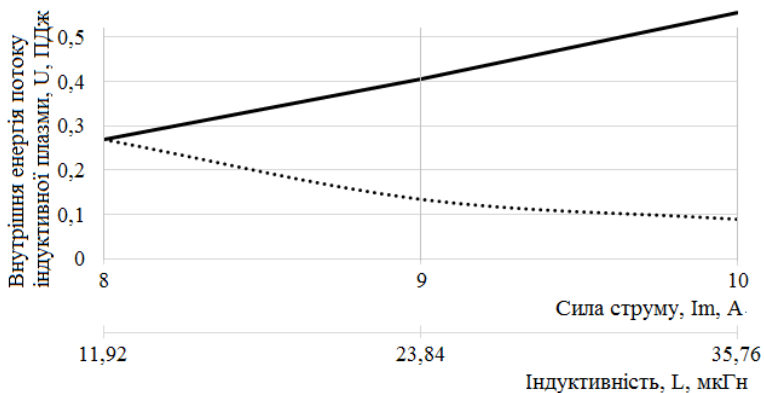


Рисунок 3.1 – Залежність внутрішньої енергії потоку індуктивної плазми від сили струму (-) та індуктивності (····)

При зміні сили струму з 8 А до 10 А, елементарні частинки плазмового потоку накопичують внутрішню енергію. Температура плазмового потоку підвищується з 7557 К до 9141 К, таблиця 3.2. Внутрішня енергія потоку індуктивної плазми зростає лінійно з 0,269 ПДж до 0,555 ПДж. При збільшенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, реактивний опір стискає уявний об'єм із сконцентрованими у ньому зарядженими елементарними частинками. При розряді потоку плазми, внутрішні сили, що протистояли стисканню, викликають вивільнення внутрішнього потенціалу середовища. Через подолання опору, збільшення індуктивності призводить до зниження внутрішньої енергії імпульсу з 0,269 ПДж до 0,089 ПДж.

3.2. Вплив внутрішньої енергії кристалічних структур гірських порід на модуль пружності I роду

Одним з основних показників міцності кристалічних структур є модуль пружності I роду [67]. За теорією Гриффітса, модуль пружності I роду, E_0 , Па [67]:

$$E_0 = \left(\sigma_p^2 \cdot \pi \cdot l \right) / (2 \cdot \gamma_c), \quad (3.17)$$

де σ_p - границя міцності на розтяг, Па;

l - довжина тріщини, м;

γ_e - поверхнева енергія, Дж/м².

Недоліком наведеної моделі є неможливість врахування внутрішньої енергії кристалічних структур при визначенні модулю пружності I роду. Через це не враховано енергетичний потенціал ГП та можливість вивільнення та направлення його на руйнування. Тому, проведене дослідження залежності модулю пружності I роду від енергії кристалічної решітки та маси елементарних частинок.

Модуль пружності I роду, E_0 , Па [68]:

$$E_0 = c^2 \cdot \rho, \quad (3.18)$$

де c – швидкість розповсюдження хвилі, м/с;

ρ – щільність ГП, кг/м³.

Швидкість розповсюдження хвилі, c , м/с [69]:

$$c = (\lambda_x \cdot \omega_{\text{пор}}) / (2 \cdot \pi), \quad (3.19)$$

де λ_x – довжина хвилі, м;

$\omega_{\text{пор}}$ – кругова частота власних коливань кристалічної структури, с⁻¹.

Довжина хвилі λ_x , м [69]:

$$\lambda_x = \hbar / m \cdot c, \quad (3.20)$$

де m – маса елементарної частинки, кг;

$c = 3 \cdot 10^8$ – швидкість світла, м/с [68].

Підставивши (3.10), (3.15) (3.19) – (3.20) у (3.18), модуль пружності І роду, E_0 , Па:

$$E_0 = \left(\varepsilon_{\text{пор}} \cdot \hbar / \hbar \cdot m \cdot c \right)^2 \cdot \rho. \quad (3.21)$$

Запропонована модель відрізняється від відомих тим, що враховує фізико-механічні параметри кристалічних структур - внутрішню енергію та масу елементарної частинки. Це дозволяє визначити енергетичний потенціал кристалічних структур для його вивільнення та направлення на руйнування ГП.

Внутрішня енергія ГП визначена як сумарна енергія зв'язків елементів, з яких складаються їх кристалічні структури, таблиця 3.4.

Таблиця 3.4 – Енергія зв'язків елементів кристалічних структур

Енергія зв'язків елементів, $\varepsilon_i \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$, Дж						Джерело
C	Ca	Fe	Mg	O	Si	[70]
7,36	1,825	2,29	1,53	–	4,64	

Внутрішня енергія кристалічної структури, ε , Дж [70]:

$$\varepsilon_{\text{пор}} = \sum \varepsilon_i. \quad (3.22)$$

Результати (3.22) зведені до таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Енергія зв'язків кристалічних структур

Енергія зв'язків кристалічних структур, $\sum \varepsilon_i \cdot 10^{-19}$, Дж			
Si ₂ O	Fe ₂ O ₃	Ca ₂ CO ₃	MgCO ₃
8,5	7,4	11,0	10,0

Методика визначення енергії зв'язків структур відповідає наближенням зонної теорії [13], коли багатоелектронні системи зводяться до одноелектронних. Поєднано зонну та квантову теорії поля [16] та хімічною теорією зв'язку [71]. Враховано необхідність направлених зв'язків (класична хімія) із наявністю відокремлених електронів (фізика), що відповідають за гальванічні властивості (енергія зв'язків, кругова частота власних коливань структури). Це досягнуто шляхом врахування координаційних чисел кристалічних структур, які залежать від геометрії решіток [72]. До таблиці 3.6 зведено типи решіток досліджуваних структур.

Таблиця 3.6 – Типи решіток досліджуваних структур

Типи решіток досліджуваних структур							
Si ₂ O	Джерело	Fe ₂ O ₃	Джерело	Ca ₂ CO ₃	Джерело	MgCO ₃	Джерело
Об'ємно-центрована кубічна (ОЦК)	[73]	ОЦК	[74]	ОЦК	[73]	ОЦК	[73]

Для ОЦК решіток прийнято координаційні числа 8 в. о. для кварцу, кальциту та магнезиту і 14 в. о. для гематиту, [72]. Після приведених перетворень (3.22), модуль пружності I роду, E₀, Па:

$$E_0 = (Z \cdot \hbar \cdot \sum \varepsilon_i / \hbar \cdot m \cdot c)^2 \cdot \rho, \quad (3.23)$$

де Z – координаційне число кристалічної решітки, в. о.

Координаційне число дозволило урахувати енергію молекулярних зв'язків, що залежить від типу кристалічної структури. Молекулярні зв'язки утримують кристалічну структуру разом при періодичному коливному русі її елементів.

Прикладення субрезонансних потоків енергії від зовнішніх джерел дозволить зруйнувати молекулярні зв'язки кристалічної структури. При цьому, вивільнена енергія може бути використана на подальше руйнування по природнім дефектностям гірських порід.

Вперше запропонована математична модель, яка враховує залежність модулю пружності I роду від параметрів кристалічних структур – тип та внутрішня енергія кристалічних решіток. Цим обґрунтовано квадратичний вплив енергетичного потенціалу кристалічних структур на параметр міцності. При збільшенні енергії зв'язків структур, міцність зростає за квадратичною залежністю. Це відбувається через збільшення запасу накопичення внутрішньої енергії впливу на них. До таблиці 3.7 зведено значення щільності мінералів.

Таблиця 3.7 – Щільності кристалічних структур

Щільність мінералів, ρ , кг/м ³							
Si ₂ O	Джерело	Fe ₂ O ₃	Джерело	Ca ₂ CO ₃	Джерело	MgCO ₃	Джерело
2680	[75]	5300	[76]	2712	[77]	2100	[78]

Результати розрахунків модулю пружності I роду структур та порівняння значень із табличними у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Порівняння модулю пружності I роду

Структура	Модуль пружності I роду розрахунковий, ГПа	Модуль пружності I роду кадастрове значення, ГПа	Джерело	Похибка, %
Гематит	191,5	207,9	[77]	7,8
Кварц	107,0	101,0		5,9
Кальцит	71,5	56,9 – 88,3		-
Магnezит	45,7	44,1		6,4

Вперше запропонована модель відрізняється від відомих тим, що:

- визначає енергетичний потенціал кристалічних структур;
- враховує вплив параметра кристалічної структури на модуль пружності I роду;
- визначає квадратичну залежність модулю пружності I роду від внутрішньої енергії кристалічних структур;
- за координаційним числом враховує тип кристалічної структури;
- узгоджує модуль пружності I роду з властивостями ГП [77].

Похибка значень для різних типів структур не перевищує 7,8 %. Результати запропонованої моделі відповідають кадастровим даним [77].

3.3. Параметри руйнування кристалічних структур гірських порід плазмо-механічними навантаженнями

Одним з основних енергетичних показників процесів руйнування гірських порід є питома робота руйнування A_v , Дж/м³, [24]:

$$A_v = A/V, \quad (3.24)$$

де $A_v = A_e + A_m$ – витрачена в процесі руйнування робота, Дж;

A_e , A_m – робота, витрачена системою руйнування індуктивною плазмою та механічною системою, відповідно, Дж;

V – об'єм зруйнованої породи, м³.

Питома енергоємність блоку плазмового руйнування (БПР), A_e , кВт·год/т [79]:

$$A_e = (P \cdot t) / (V_{\text{пор}} \cdot \rho), \quad (3.25)$$

де P – потужність системи руйнування індуктивною плазмою, Вт.

$V_{\text{пор}}$ – об’єм зразка ГП, що руйнується, м³.

Потужність системи визначається потужністю обладнання та електричною потужністю, Р, кВт [65]:

$$P = \sqrt{(I_m \cdot \omega_m \cdot L)^2 + (I_m \cdot U_m)^2} + P_{AT} + P_T, \quad (3.26)$$

де $\omega_m = 314$ - кругова частота мережі, визначено експериментально, с⁻¹;

U_m - напруга мережі, визначено експериментально, В;

$P_T = 630$, $P_{AT} = 400$ - потужність підвищувального та автотрансформатора, відповідно, визначено експериментально, Вт.

Недоліком (3.25) та (3.26) є неврахування впливу накопиченої енергії кристалічних структур на питому енергоємність їх руйнування потоком індуктивної плазми. Відношення початкового модулю пружності I роду структури E_0 до кінцевого E_k після руйнування ГП потоком індуктивної плазми враховує основний показник міцності при визначенні питомої енергоємності БПР, А, кВт·год/т:

$$A_e = (P \cdot t) / (V_{\text{пор}} \cdot \rho \cdot (E_0 / E_k)). \quad (3.27)$$

Запропонована модель (3.27) відрізняється від відомих тим, що враховує:

- зміну потенціалу внутрішніх джерел енергії при руйнуванні потоком індуктивної плазми;
- вплив кругової частоти власних коливань, параметру та енергії кристалічних структур на питому енергоємність БПР.

Недоліком (3.27) є неврахування впливу параметрів кристалічних структур після руйнування на питому енергоємність. Це не дозволяє визначити енергетичний вплив внутрішньої енергії кристалічних структур на питому енергоємність руйнування і знизити її за рахунок використання енергії внутрішніх джерел.

Енергія, U , Дж [65]:

$$U = 0,5 \cdot \left(L \cdot I_m^2 + C \cdot U_a^2 \right). \quad (3.28)$$

Прирівнявши (3.28) до визначення енергії електротермічного руйнування [80], модуль пружності I роду, E_k , Па:

$$E_k = \frac{124 \cdot t \cdot \sigma_p \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{(1-\nu) \cdot V_{\text{пор}} \cdot K_{\text{пл}}}{R}}}{\alpha \cdot \left[L \cdot I_m^2 + C \cdot U_a^2 \right] \cdot \ln R}, \quad (3.29)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

ν - коефіцієнт Пуассона, в. о.;

$K_{\text{пл}}$ - коефіцієнт пластичності, в. о.;

$R = 0,1$ – визначений експериментально радіус розігрітого зразка, м;

α - коефіцієнт лінійного теплового розширення, K^{-1} .

Відповідно до [81], границя міцності структури на розтягнення σ_p , Па:

$$\sigma_p = \left(2 \cdot m \cdot V_v^2 \right) / \left(\pi \cdot a_{\text{кр}} \cdot \delta_m^2 \right), \quad (3.30)$$

де V_v - швидкість руйнівного впливу на структуру, м/с;

$a_{\text{кр}}$ - параметр кристалічної решітки, м;

$\delta_m = 3 \cdot 10^{-13}$ - діаметр мотивної одиниці структури, м [81].

Швидкість руйнівного впливу потоку плазми на структуру, V_B , м/с [60]:

$$V_B = \sqrt{(k \cdot T_{\text{ПЛ}}) / (m)} . \quad (3.31)$$

Підставивши (3.31) у (3.30), а (3.30) у (3.29), модуль пружності І роду, E_K , Па:

$$E_K = \frac{248 \cdot t \cdot k \cdot T_{\text{ПЛ}} \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{(1-\nu) \cdot V_{\text{пор}} \cdot \kappa_{\text{ПЛ}}}{R}}}{\pi \cdot a_{\text{кр}} \cdot \delta_m^2 \cdot \alpha \cdot [L \cdot I_m^2 + C \cdot U_a^2] \cdot \ln R} . \quad (3.32)$$

Підставивши (3.7) та (3.10) до (3.32), модуль пружності І роду, E_K , Па:

$$E_K = \frac{496 \cdot t \cdot \varepsilon_{\text{пор}} \cdot p \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{(1-\nu) \cdot V_{\text{пор}} \cdot \kappa_{\text{ПЛ}}}{R}}}{\omega_{\text{пор}} \cdot h \cdot a_{\text{кр}} \cdot \delta_m^2 \cdot \alpha \cdot [L \cdot I_m^2 + C \cdot U_a^2] \cdot N_{\text{ПЛ}} \cdot \ln R} . \quad (3.33)$$

Підставивши (3.13) до (3.12), енергія електрична, $W_{\text{э}}$, Дж:

$$W_{\text{э}} = \left(2 \cdot I_m^2 \cdot t^2 \right) / C . \quad (3.34)$$

Кругова частота ω , с^{-1} [65]:

$$\omega = 1 / \sqrt{L \cdot C} . \quad (3.35)$$

Підставивши (3.35) до (3.34) та прирівнявши до (3.12), сила струму, I_m , А:

$$I = (C_M \cdot U_a) / 2 \cdot t, \quad (3.36)$$

де C_M - міжвиткова ємність, Ф.

Міжвиткова ємність, C_M , Ф [82]:

$$C_M = (\pi \cdot D) / \left(8,3 \cdot \lg \left[\frac{d_{\text{ж}}}{d_i} + \sqrt{\left(\frac{d_{\text{ж}}}{d_i} \right)^2 - 1} \right] \right), \quad (3.37)$$

де $D = 0,25$ – визначений експериментально діаметр котушки індуктивності, м;

$d_{\text{ж}} = 0,000472$, $d_i = 0,000450$ - визначені експериментально діаметр жили обмотки котушки індуктивності з та без ізоляції, відповідно, м.

Підставивши (3.37) до (3.33), модуль пружності I роду після руйнування, E_k , Па:

$$E_k = \frac{496 \cdot t \cdot \varepsilon_{\text{пор}} \cdot p \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{(1-\nu) \cdot V_{\text{пор}} \cdot \kappa_{\text{пл}}}{R}}}{\omega_{\text{пор}} \cdot h \cdot a_{\text{кр}} \cdot \delta_m^2 \cdot \alpha \cdot \left[L \cdot I_m^2 + \left((C_M \cdot U_a \cdot \omega)^2 \cdot L \right) \right] \cdot N_{\text{пл}} \cdot \ln R}. \quad (3.38)$$

Запропонована модель (3.38) відрізняється від відомих тим, що вперше враховує:

- потенціал внутрішніх джерел енергії при ослабленні структур потоком індуктивної плазми;
- залежність модулю пружності I роду від параметрів, а саме:

а. блоку плазмового руйнування – сила струму, напруга, індуктивність, міжвиткова ємність котушки індуктивності, кругова частота коливань мережі, час впливу, тиск навколишнього середовища;

б. потоку індуктивної плазми – концентрація та радіус потоку плазми;

с. кристалічних структур – кругова частота власних коливань та енергія кристалічних структур, параметр решітки, діаметр мотивної одиниці структури, коефіцієнт пластичності, коефіцієнт лінійного теплового розширення.

Методом експериментального моделювання визначено коригуючі функції двокомпонентної системи від зміни індуктивності та сили струму, рисунок 3.2.

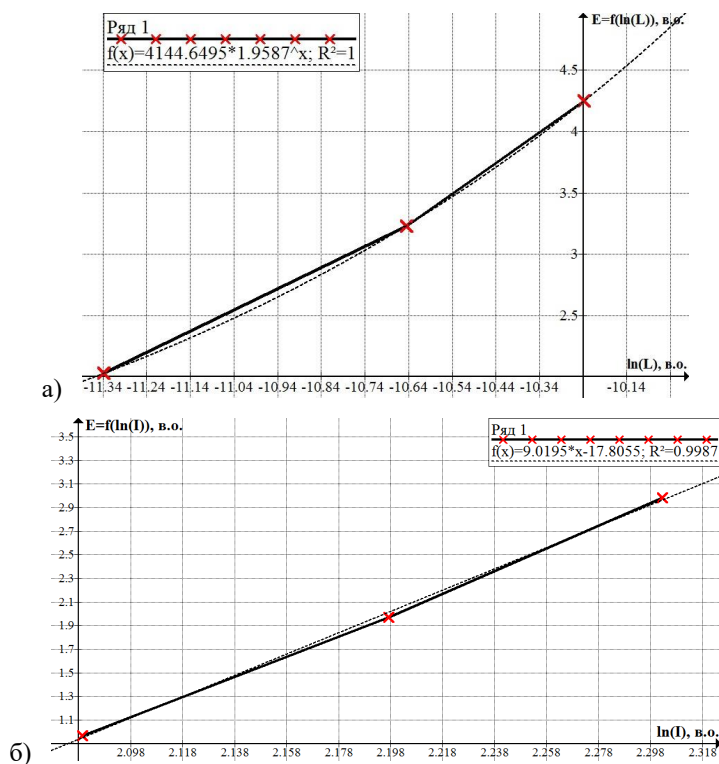


Рисунок 3.2 – Коригуюче прогнозування зміни індуктивності а) та зміни сили струму б) в БПР, де x – прологарифмовані значення індуктивності, R^2 – коефіцієнт збіжності

Модуль пружності І роду визначено з урахуванням коригуючих функцій $f(x)$. Через нелінійність впливу індуктивності та сили струму на параметр міцності, введено прогнозування у двокомпонентній системі. Індуктивність та сила струму логарифмуванням понижено у степені. Їх функції прирівняно до функцій частки між математичним та експериментальним дослідженням, що позначені точками, співпадіння на рисунку 3.2. За рахунок прогнозування логарифмованих функцій досягнуто коефіцієнтів збіжності 1,00 в. о. та 0,99 в. о. між математичним та експериментальним дослідженням нелінійного впливу індуктивності та сили струму, відповідно.

Визначено коригуючі функції тенденцій для зміни індуктивності – степенева, та сили струму – лінійна, і уточнено модуль пружності І роду після руйнування, E_k , Па:

$$E_k = \frac{496 \cdot t \cdot \varepsilon_{\text{пор}} \cdot p \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{(1-v) \cdot V_{\text{пор}} \cdot K_{\text{пл}}}{R}} \cdot \left(4144,1526 \cdot 1,9584^{\ln(L)} \right) \cdot (9,0295 \ln(I_m) - 17,8055)}{\omega_{\text{пор}} \cdot h \cdot a_{\text{кр}} \cdot \delta_m^2 \cdot \alpha \cdot \left[L \cdot I_m^2 + \left((C_m \cdot U_a \cdot \omega)^2 \cdot L \right) \right] \cdot N_{\text{пл}} \cdot \ln R} \quad (3.39)$$

Вперше запропонована модель модулю пружності І роду відрізняється від відомих тим, що враховує:

- енергетичний вплив кристалічних структур та БПР на параметр міцності при ослабленні їх потоком індуктивної плазми;
- залежність модулю пружності І роду від параметрів технологічних, потоку плазми, кристалічних структур;
- коригуючі функції двокомпонентної системи зміни індуктивності та сили струму;
- внутрішні і зовнішні джерела енергії при руйнуванні кристалічних структур потоком індуктивної плазми.

Для визначення залежностей модулю пружності І роду від сили струму та індуктивності, фізичні параметри кристалічних структур у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Фізичні параметри кристалічних структур

Структура	Параметр кристалічної решітки, $a_{кр} \cdot 10^{-10}$, м	Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/(м·К)	Коефіцієнт Пуассона, ν , в. о.	Коефіцієнт лінійного теплового розширення, $\alpha \cdot 10^5$, K^{-1}	Коефіцієнт пластичності, $\kappa_{пл}$, в. о.	Джерело
Гематит	0,4914	12,0	0,08	1,130	2,0	[77]
Кварц	0,5033	12,0	0,14	0,800	4,3	
Кальцит	0,4990	3,6	0,29	0,435	7,0	
Магnezит	0,4633	4,6	0,30	0,885	6,0	

На рисунках 3.3 – 3.4 наведено значення модулю пружності I роду при ослабленні кристалічних структур потоком індуктивної плазми.

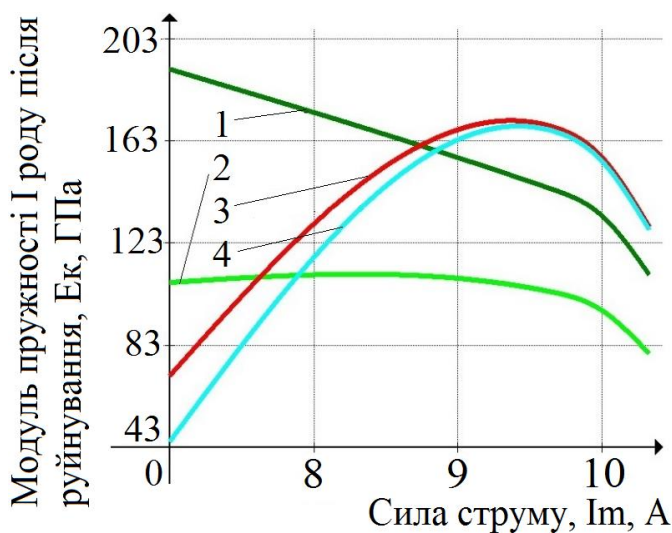


Рисунок 3.3 – Залежність модулю пружності I роду від зміни сили струму при ослабленні кристалічних структур, де 1 – крива значень гематиту, 2 – кварцу, 3 – кальциту, 4 – магнезиту

Ослаблення кристалічних структур при зміні сили струму у БПР відбувається за із позитивною асиметрією при збільшенні індуктивності та із негативною асиметрією при збільшенні струму комбінованого навантаження із піком: 0 – для кварцу та гематиту; 8 – для кальциту та магнезиту. В процесі ослаблення кристалічних структур потоком індуктивної плазми відбувається руйнування слабких фракцій, а потім міцних. При руйнуванні слабких фракцій в структурах кальциту та магнезиту підвищується модуль пружності I роду з 71,5 ГПа до 168,9 ГПа та з 45,7 ГПа до 167,2 ГПа відповідно. В структурах кварцу та гематиту енергетичний потенціал плазми руйнує одразу міцні фракції. Відбувається ослаблення структури за розподілом із негативною асиметрією із піком при нульовій силі струму. Пік характеризує очікувану точку руйнування міцних фракцій структур.

При збільшенні сили струму до 8 А, кварц і гематит знеміцнюються через руйнування міцних фракцій. Ослаблення структур мінералів до 80,2 ГПа і 111,0 ГПа, відповідно, відбувається за розподілом із негативною асиметрією із піком при нульовій силі струму. У пікових точках зафіксовано каверни від асиметричних субрезонансних коливань растровим електронним мікроскопом РЕМ-106И. Це призводить до руйнування зв'язків кристалічних структур ГП.

При збільшенні сили струму до 8 А відбувається руйнування слабких фракцій у кальциті та магнезиті і їх модуль пружності I роду підвищується з 71,5 ГПа до 168,9 ГПа та з 45,7 ГПа до 167,2 ГПа, відповідно. Кальцит належить до групи ауксетиків [84]. При збільшенні сили струму до 8 А, шарніроподібні кристалічні структури розширюються перпендикулярно прикладеному навантаженню [84]. При цьому змінюється міра ангармонізму міжатомних коливань слабких фракцій [85]. Експериментально доведено [86], що зростання параметру кристалічної решітки до 0,5 % відбувається через розширення кристалічних структур, при розтягненні їх зв'язків. При цьому збільшується амплітуда коливань кристалічних структур, а отже знижується частота. Коефіцієнт субрезонансу збільшується, а кристалічна структура зміцнюється. Магнезит має властивість нелінійно збільшувати власну термостійкість при підвищенні температури до (1773 – 1923) К [83]. При підвищенні

індуктивності до 8 А, температура потоку плазми збільшилась до 7557 К, таблиця 3.2. Це призвело до кристалізації структур магнезиту і збільшення його модулю пружності I роду з 45,7 ГПа до 167,2 ГПа.

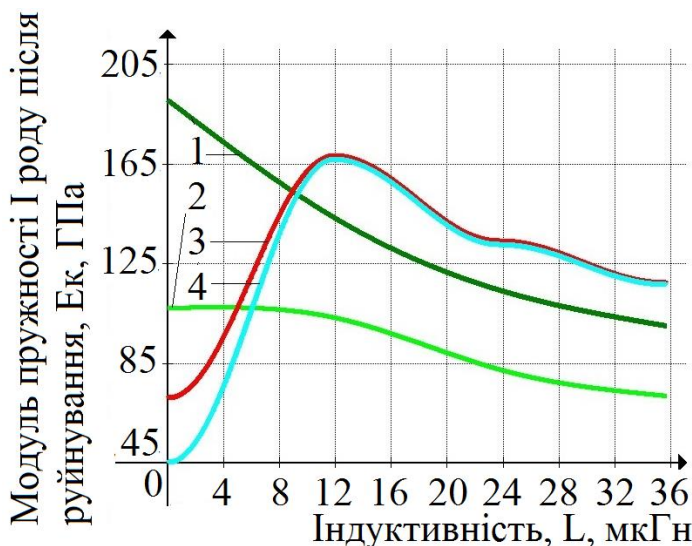


Рисунок 3.4 – Залежність модулю пружності I роду від зміни індуктивності при ослабленні кристалічних структур, де 1 – крива значень гематиту, 2 – кварцу, 3 – кальциту, 4 – магнезиту

При підвищенні сили струму з 8 до 10 А, модуль пружності I роду кальциту і магнезиту оберненопропорційно знижуються з 168,9 ГПа до 129,8 ГПа та з 167,2 ГПа до 128,6 ГПа, відповідно. При цьому коефіцієнт субрезонансу стає нижчим $7,37 \cdot 10^{-9}$ в. о. і продовжує наближатися до нуля, таблиця 3.10. У кристалічних структурах виникають асиметричні субрезонанси. Руйнуються кристалічні зв'язки і вноситься штучна дефектність до існуючої природної.

При збільшенні індуктивності до 35,76 мкГн, кварц і гематит знеміцнюються через руйнування міцних фракцій. Ослаблення їх структур до 72,8 ГПа і 100,7 ГПа, відповідно. При збільшенні індуктивності до 11,92 мкГн, змінюється міра ангармонізму міжатомних коливань слабких фракцій. Їх модуль пружності I роду

підвищується з 83,5 ГПа до 168,9 ГПа та з 45,7 ГПа до 167,2 ГПа, відповідно. Кальцит належить до групи ауксетиків [84]. Експериментально доведено [86], що зростання параметру кристалічної решітки до 0,5 % відбувається через розширення кристалічних структур, при розтягненні їх зв'язків. При цьому збільшується амплітуда коливань кристалічних структур, а отже знижується частота. Коефіцієнт субрезонансу збільшується, а кристалічна структура зміцнюється. Магnezит має властивість нелінійно збільшувати власну термостійкість при підвищенні температури до (1773 – 1923) К [83]. При підвищенні індуктивності до 11,92 мкГн, температура потоку плазми наближена до 7557 К, таблиця 3.2. Це призводить до кристалізації структур магнезиту і збільшення модулю пружності I роду з 71,5 ГПа до 167,2 ГПа.

При підвищенні індуктивності з 23,84 мкГн до 35,76 мкГн, модуль пружності I роду кальциту і магнезиту оберненопропорційно знижуються з 168,9 ГПа до 117,8 ГПа та з 167,2 ГПа до 116,6 ГПа, відповідно. Енергія потоку індуктивної плазми знизилась з 0,269 ПДж до 0,089 ПДж, рисунок 3.1. Частота власних коливань плазми знизилась з $0,591 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ до $0,537 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, таблиця 3.2. Коефіцієнт субрезонансу знизився до $5,93 \cdot 10^{-9}$ в. о. та до $6,53 \cdot 10^{-9}$ в. о., відповідно, таблиця 3.10. При наближенні коефіцієнта субрезонансу до нуля, виникають асиметричні субрезонанси, внаслідок яких руйнуються кристалічні структури і внесена дефектність знижує енергоємність руйнування до 1,84 разів для кальциту та до 0,92 разів для магнезиту нижча за традиційні способи руйнування, таблиця 3.12.

Пік для кальциту і магнезиту більший від піків для кварцу і гематиту через більший на 19 % коефіцієнт субрезонансу, $6,69 \cdot 10^{-9}$ в. о. та $7,37 \cdot 10^{-9}$ в. о. відповідно, дивись (3.39). При взаємодії коливань потоку індуктивної плазми та власних коливань кристалічних структур, виникає субрезонанс через збігання фази коливань. Фаза коливань збіжна, якщо власні коливання кристалічних структур підштовхуються коливаннями потоку індуктивної плазми. Визначено коефіцієнт субрезонансу – кількість періодів власних коливань кристалічних структур, що приходяться на коливання потоку індуктивної плазми.

При досягненні коефіцієнтом субрезонансу одиниці – відбувається явище резонансу. Кристалічна структура виступає у якості хвильовода. При цьому, хвильовід має природну дефектність. Виходячи із досліджень [87], виникає модель Фано – Андерсона. При наближенні коефіцієнта субрезонанса до нуля, виникають асиметричні субрезонанси. Оскільки модель руйнування потоком індуктивної плазми нелінійна, то з'являється залежність модулю пружності I роду від інтенсивності впливу потоку індуктивної плазми, що керуються коефіцієнтом субрезонансу [88]. Зсув положення піків процесу ослаблення кристалічних структур виявляє бістабільну поведінку субрезонансу в двокомпонентній системі.

У таблицю 3.10 зведено значення коефіцієнтів субрезонансу Q , в. о. [88]:

$$Q = \omega_{\text{пл}} / \omega_{\text{пор}} \cdot \quad (3.40)$$

Таблиця 3.10 – Залежність коефіцієнту субрезонансу від кругової частоти власних коливань потоку індуктивної плазми

Кругова частота власних коливань потоку індуктивної плазми, $\omega_{\text{пл}} \cdot 10^9$, с^{-1}	Коефіцієнт субрезонансу, $Q \cdot 10^{-9}$, в. о.			
	Кварц	Гематит	Кальцит	Магnezит
0,914	5,73	6,05	7,08	7,79
0,629	5,42	5,72	6,69	7,37
0,594	5,20	5,49	6,43	7,08
0,537	3,69	3,89	4,55	5,01
0,380	3,63	3,83	4,48	4,93
0,374	3,51	3,71	4,34	4,78

В структурах кварцу та гематиту при зниженні коефіцієнту субрезонансу з $5,73 \cdot 10^{-9}$ в. о. до $5,20 \cdot 10^{-9}$ в. о., відбувається руйнування міцних фракцій і модуль пружності I роду лінійно знижується із піком в нулі. Структури кальциту та магнезиту зменшують кількість дефектів за рахунок руйнування слабких фракцій, і

домінування міцних фракцій. При зниженні значення коефіцієнту субрезонансу нижче $7,08 \cdot 10^{-9}$ в. о. та $7,79 \cdot 10^{-9}$ в. о., відповідно, руйнуються міцні фракції і кристалічна структура ослаблюється. Асиметричний субрезонанс проявляється при значеннях коефіцієнту субрезонансу нижче $7,37 \cdot 10^{-9}$ в. о. та $6,69 \cdot 10^{-9}$ в. о. для магнетиту та кальциту, відповідно. Це виражається у руйнуванні міцних фракцій кристалічних структур, а на графіках відмічене піковими точками. Для структур гематиту та кварцу асиметричний субрезонанс настає при значеннях коефіцієнту субрезонансу нижче за $6,05 \cdot 10^{-9}$ в. о. та $5,73 \cdot 10^{-9}$ в. о., відповідно, що також відмічене піковими точками.

Вперше при ослабленні кристалічних структур потоком індуктивної плазми визначено характер їх знеміцнення за розподілом із позитивною асиметрією при збільшенні індуктивності та із негативною асиметрією при збільшенні струму комбінованого навантаження. Пікова точка показує асиметричний субрезонанс у моделі Фано – Андерсона. Асиметричний субрезонанс для структур кальциту та магнетиту зміщений, у зв'язку з тим, що руйнуються слабкі фракції. При взаємодії їх із потоком індуктивної плазми, вони кристалізуються. При асиметричному субрезонансі зв'язки кристалічних структур міцних фракцій розриваються. Екстремуми асиметричного розподілу – зафіксовані точки руйнування міцних фракцій. При цьому відбувається руйнування кристалічних структур і знеміцнення. Зафіксовано оберненопропорційну залежність між піковими точками функцій (екстремумами) та коефіцієнтом субрезонансу. Визначено, що із наближенням коефіцієнту субрезонансу до нуля виникають асиметричні субрезонанси. Зафіксовано одиничний асиметричний субрезонанс при значенні коефіцієнту субрезонансу, наближеному до $(7,08 - 7,79) \cdot 10^{-9}$ в. о. За рахунок субрезонансних коливань потоку індуктивної плазми частотою $(0,591 - 0,537) \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ досягнуто:

- ослаблення кристалічних структур кварцу та гематиту з 107,9 ГПа до 72,8 ГПа та з 191,4 ГПа до 100,7 ГПа, відповідно, при зміні індуктивності до 35,76 мкГн;
- ослаблення кристалічних структур кварцу та гематиту з 107,9 ГПа до 80,2 ГПа та з 191,4 ГПа до 111,0 ГПа, відповідно, при зміні сили струму до 10 А;

- кристалізація структур кальциту та магнезиту через руйнування слабких фракцій структур при зміні індуктивності до 11,92 мкГн, або при зміні сили струму до 8 А. Модуль пружності І роду при цьому зріс з 71,5 ГПа до 168,9 ГПа та з 45,7 ГПа до 167,2 ГПа, відповідно;

- ослаблення кристалізованих структур кальциту та магнезиту при підвищенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн. Модуль пружності І роду при цьому знизився до 117,8 ГПа та 116,6 ГПа, відповідно. При підвищенні сили струму з 8 А до 10 А, модуль пружності І роду знизився до 129,8 ГПа та 128,6 ГПа, відповідно.

При ослабленні кристалічних структур враховано явище анізотропії. Це досягнуто врахуванням коефіцієнту анізотропії у програмній моделі. Коефіцієнт анізотропії на стиснення сягає 1,34 в. о. та на розтягнення - 0,59 в. о. [89]. Так як при руйнуванні неможливо оцінити вектор прикладеного навантаження до окремої структури, то методом середнього квадратичного [90] визначено значення коефіцієнту анізотропії 1,035 в. о. Для моделювання створено віртуальний прилад, рисунок 3.5, якій відрізняється від відомих тим, що:

- містить «Модуль анізотропії» і враховує зміну кристалічних структур в процесі їх ослаблення;

- генератор випадкових чисел, що входить до «Модулю анізотропії», імітує випадкову зміну кристалічних структур;

- враховує коефіцієнт анізотропії параметру кристалічних структур, рівний 7,2 %, у реальних процесах.

Запропонована зміна параметру кристалічних решіток, що впливає на їх ослаблення. Асиметричний субрезонанс відбувається за рахунок розтягнення молекулярних зв'язків, які описують параметр кристалічних структур. Визначено що, кристалічні структури ослаблюються за розподілом із позитивною асиметрією при збільшенні індуктивності та із негативною асиметрією при збільшенні струму комбінованого навантаження. Встановлено, що значення модулю пружності І-го роду із врахуванням анізотропії гірських порід змінюються в межах плюс - мінус 6 %, рисунок 3.5.

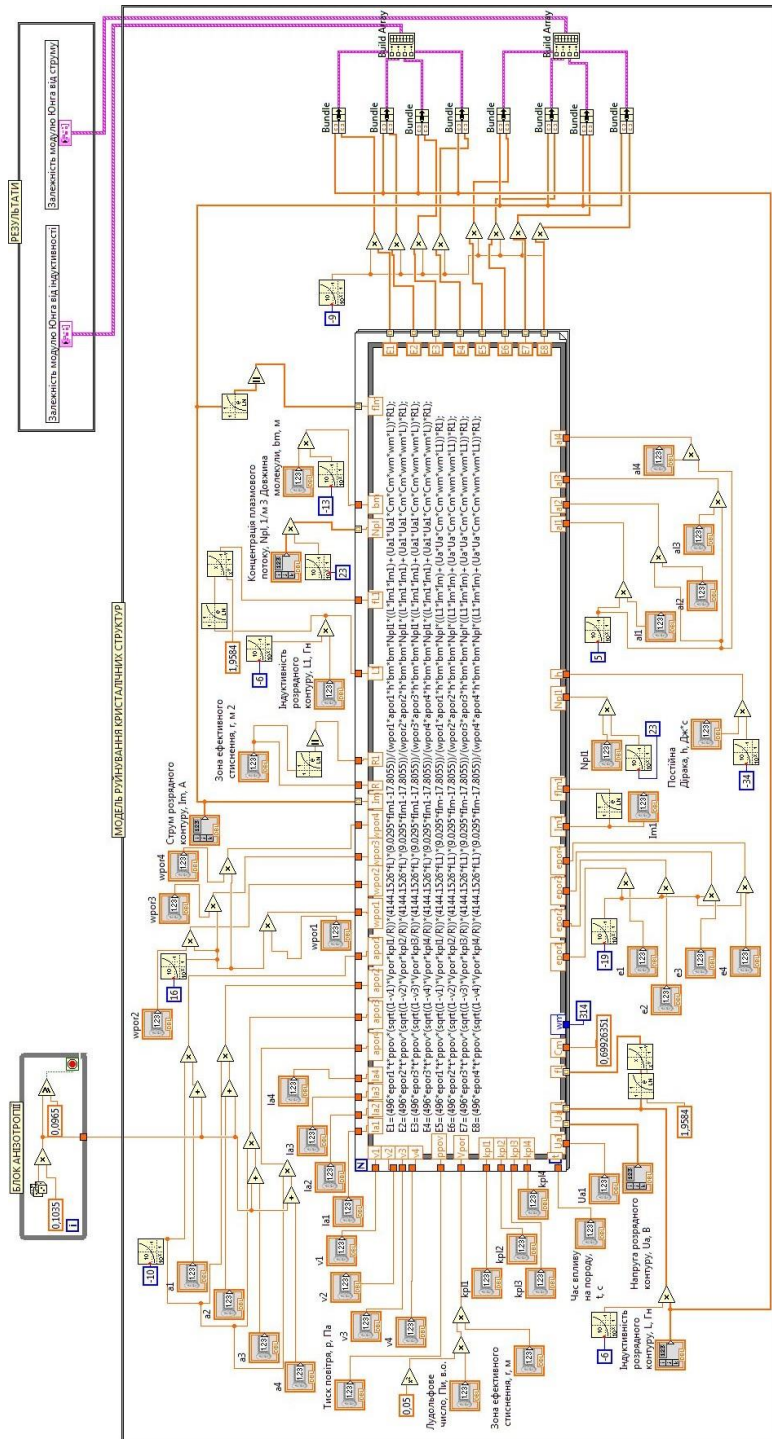


Рисунок 3.5 – Блок – діаграма програмного коду в оболонці LabView

Модуль пружності I роду після руйнування потоком індуктивної плазми дозволяє оцінити вплив накопиченої енергії кристалічних структур на питому енергоємність їх руйнування. Відношення початкового модулю пружності I роду E_0 структури до її модулю пружності I роду E_k після руйнування потоком індуктивної плазми надає можливість врахувати основний показник міцності при визначенні питомої енергоємності системи руйнування індуктивною плазмою, A , кВт·год/т:

$$A = \frac{P \cdot t}{V_{\text{пор}} \cdot \rho \cdot \frac{E_0}{E_k}} \quad (3.41)$$

Запропонована модель відрізняється від існуючих тим, що вперше:

- визначає вплив за асиметричним розподілом сили струму та індуктивності блоку плазмового руйнування на питому енергоємність руйнування кристалічних структур, дивись (3.39);
- враховує енергетичний потенціал кристалічних структур до руйнування потоком індуктивної плазми, який виражений енергією зв'язків та типом кристалічних структур, дивись (3.23);
- зв'язує показники потоку плазми (концентрацію, радіус, довжину) із параметрами кристалічних структур (кругову частоту власних коливань, внутрішню енергію, параметр кристалічної структури, діаметр мотивної одиниці структури), що дозволяє визначити вплив фізичних показників на технологічні;
- визначає коригуючі функції зміни індуктивності та сили струму;
- враховує вплив внутрішніх і зовнішніх джерел енергії при ослабленні кристалічних структур потоком індуктивної плазми на питому енергоємність руйнування.

Питома енергоємність плазмового руйнування індуктивною плазмою за (3.41) наведені у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Питома енергоємність плазмового руйнування індуктивною плазмою від сили струму та індуктивності

Зміна параметру системи руйнування індуктивною плазмою	Зміна сили струму, А			Зміна індуктивності, мкГн		
	8	9	10	11,92	23,84	35,76
Потужність БПР, кВт	2,490	2,710	2,930	2,490		
Питома енергоємність руйнування, кВт·год/т	Гематит					
	12,539	12,709	11,344	12,539	9,990	8,746
	Кварц					
	31,777	32,210	28,750	31,777	25,317	22,216
	Кальцит					
	76,633	77,677	69,332	76,633	61,054	53,454
	Магnezит					
	153,397	155,486	138,782	153,397	122,213	107,000

Зниження питомої енергоємності для гематиту та кварцу має лінійний спадний характер. При підвищенні сили струму з 8 А до 10 А, лінійно підвищується потужність системи з 2,490 кВт до 2,930 кВт. Це викликає ослаблення структур. Питома енергоємність при цьому знижується з 12,539 кВт·год/т до 11,344 кВт·год/т для гематиту та з 31,777 кВт·год/т до 28,750 кВт·год/т для кварцу. Це відбувається через виникнення субрезонансних коливань між потоком індуктивної плазми та власними коливаннями кристалічних структур. При підвищенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, потужність системи незмінна і становить 2,490 кВт. Енергія потоку індуктивної плазми знизилась з 0,269 ПДж до 0,089 ПДж, рисунок 3.1. Кругова частота власних коливань плазми знизилась з $0,591 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ до $0,537 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, таблиця 3.2, і коефіцієнт субрезонансу знизився з $6,05 \cdot 10^{-9}$ в. о. до $5,49 \cdot 10^{-9}$ в. о., таблиця 3.10. При наближенні коефіцієнта субрезонанса до нуля, виникають асиметричні субрезонанси. Тому питома енергоємність руйнування гематиту лінійно знизилась з 12,539 кВт·год/т до 8,746 кВт·год/т, що на 2,598 кВт·год/т менше, ніж при збільшенні сили струму з 8 А до 10 А. Питома енергоємність

руйнування кварцу лінійно знизилась з 31,777 кВт·год/т до 28,750 кВт·год/т, що на 2,970 кВт·год/т менше, ніж при збільшенні сили струму з 8 А до 10 А. Зміна індуктивності не призводить до збільшення потужності системи через незмінні силу струму та напругу. При збільшенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, потужність лінійно підвищується на 0,29 мкВт, через низький вплив реактивної складової на номінальну потужність обладнання.

Зниження питомої енергоємності при збільшенні сили струму для кальциту та магнезиту має дві характерні ділянки. На першій характерній ділянці при збільшенні сили струму до 9 А, питома енергоємність руйнування лінійно збільшується з 76,633 кВт·год/т до 77,677 кВт·год/т для кальциту та з 153,397 кВт·год/т до 155,486 кВт·год/т для магнезиту. При збільшенні сили струму до 9 А, руйнуються спочатку слабкі фракції. Зменшується кількість дефектних структур. Відбувається кристалізація і зростає питома енергоємність руйнування. Кристалізація відбувається через прикладення навантаження до ауксетиків у кальциту та підвищення термостійкості магнезиту. На другій характерній ділянці при збільшенні сили струму з 9 А до 10 А, коефіцієнт субрезонансу знижується, таблиця 3.10. Коефіцієнт субрезонансу наближений до визначеного піку виникнення асиметричного субрезонансу і питома енергоємність руйнування знижується з 77,677 кВт·год/т до 69,332 кВт·год/т для кальциту та з 155,488 до 138,782 кВт·год/т для магнезиту.

При підвищенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, потужність системи не змінна і становить 2,490 кВт. Енергія потоку індуктивної плазми знизилась з 0,269 до 0,089 ПДж, рисунок 3.1. Кругова частота власних коливань плазми знизилась, таблиця 3.2, і коефіцієнт субрезонансу знизився, таблиця 3.10. При наближенні коефіцієнта субрезонансу до нуля, виникають чисельні асиметричні субрезонанси. Тому питома енергоємність руйнування лінійно знизилась з 76,633 кВт·год/т до 53,454 кВт·год/т для кальциту і з 153,397 кВт·год/т до 107,000 кВт·год/т для магнезиту.

На руйнування структур гематитів та кварцу на кар'єрах витрачають до 28,5 кВт·год/т [91]. Це сягає 71,25 % витрат електроенергії підприємства. З них,

енергоємність вибуху становить до 5 % - 1,4 кВт·год/т [92]. Решта 95 % - 27,1 кВт·год/т, витрачається на навантаження вибою перед руйнуванням та теплове розсіювання. Вартість вибухової енергії від 11,56 разів до 31,78 разів вища за електричну [92]. Тому, для зручності підрахунків, енергія вибуху приведена до електричної. Отже, на руйнування структур гематитів та кварцу на кар'єрах витрачають до 58,8 кВт·год/т електричної енергії. Використовуючи систему руйнування індуктивною плазмою, питома енергія руйнування знижується у 6,72 рази для гематиту та у 2,64 рази для кварцу. Нижче значення питомої енергії руйнування гематиту пояснюється при його більшій міцності пояснюється виникненням субрезонансних явищ. При зниженні коефіцієнту субрезонансу від $6,05 \cdot 10^{-9}$ в. о. до $5,72 \cdot 10^{-9}$ в. о. спостерігалось зниження міцності структур до двох разів для гематиту.

На руйнування карбонатних структур, до яких відносяться кальцит та магнезит витрачається 98,8 кВт·год/т [93]. Використовуючи систему руйнування індуктивною плазмою, питома енергія руйнування знижується у 1,84 рази для кальциту та збільшується у 1,08 рази для магнезиту. На руйнування магнезиту витрачається на 53,546 кВт·год/т більше, ніж на руйнування кальциту, таблиця 3.11, через його властивість нелінійно збільшувати термостійкість при підвищенні температури до (1773 – 1923) К [83]. Температура потоку індуктивної плазми коливається від 7557 К до 9141 К, таблиця 3.2. Це призводить до кристалізації структур магнезиту і підвищення їх модулю пружності I роду в 1,6 разів з 45,7 ГПа, рисунки 3.3 – 3.4.

Питома робота механічного руйнування, A_M , Дж/м³ [24]:

$$A_M = A_c / V_{\text{пор}}, \quad (3.42)$$

де $A_c = P_c \cdot t$ – робота механічного станка, Дж [79];

P_c - потужність механічного станка, Вт;

t – час роботи механічного станка, с;

$V_{\text{пор}} = \pi \cdot r_n^2 \cdot l_n$ – об'єм зруйнованої структури, м^3 [63];

r_n – радіус зони зруйнованої структури, м ;

l_n – довжина зони зруйнованої структури, м .

Підставивши (3.10), (3.15) та (3.23) до (3.42), питома робота механічного руйнування, A_M , Дж/м^3 :

$$A_M = \frac{P_c \cdot t \cdot m \cdot c}{Z \cdot \sum \varepsilon_i \cdot V_{\text{пор}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E_a}}}, \quad (3.43)$$

де E_a - модуль пружності І роду структури на момент механічного руйнування, Па .

Підставивши (3.43) та (3.41) до (3.24), питома робота плазмо-механічного руйнування, A_v , Дж/м^3 :

$$A_v = \frac{P_c \cdot t \cdot m \cdot c}{Z \cdot \sum \varepsilon_i \cdot V_{\text{пор}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E_a}}} + \frac{P \cdot t}{V_{\text{пор}} \cdot \frac{E_0}{E_k}}. \quad (3.44)$$

Вперше розроблена математична модель питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування відрізняється від відомих тим, що:

- зв'язує питому енергоємність плазмо-механічного руйнування із питомими енергоємностями механічного та плазмового руйнування;
- визначає прямопропорційну залежність питомої енергоємності комбінованого руйнування із модулем пружності І роду після руйнування потоком індуктивної плазми;
- визначає зниження питомої енергоємності руйнування при зміні сили струму та індуктивності;
- враховує явище анізотропії при плазмо-механічному руйнуванні структур.

Запропонована модель питомої енергоємності комбінованого руйнування визначає:

- кругову частоту власних коливань;
- внутрішню енергію, що накопичена в породному масиві;
- параметр кристалічної структури;
- діаметр мотивної одиниці структури.

Це дозволило визначити вплив фізичних показників на технологічні за рахунок введення коригуючих функцій зміни індуктивності та сили струму. Досягнуто врахування впливу внутрішніх і зовнішніх джерел енергії на питому енергоємність руйнування при руйнуванні кристалічних структур потоком індуктивної плазми.

Для визначення питомої роботи руйнування кристалічних структур потоком індуктивної плазми серед найпоширеніших бурових станків [94-97], обрано параметри СБШ-250 із потужністю 650 кВт.

У таблиці 3.12 наведено питома енергоємність руйнування. Зміна сили струму з 8 А до 10 А викликає підвищення температури плазмового каналу. Електрони плазмового каналу накопичують внутрішню енергію. Енергетичний потенціал потоку індуктивної плазми зростає лінійно з 0,269 ПДж до 0,555 ПДж. Індуктивний опір стискає уявний об'єм із сконцентрованими у ньому зарядженими елементарними частинками. Тому, при розряді потоку плазми, внутрішні сили, що протистояли стисканню, викликають вивільнення внутрішнього потенціалу середовища. Через подолання опору, збільшення індуктивності у розрядному контурі призводить до зниження внутрішньої енергії імпульсу. Енергія потоку знижується з 0,269 ПДж до 0,089 ПДж. В структурах кварцу та гематиту при зниженні коефіцієнту субрезонансу, таблиця 3.10, відбувається руйнування міцних фракцій і модуль пружності I роду лінійно знижується із піком в нулі. Це призводить до зниження питомої енергоємності руйнування до 25 %, таблиця 3.12. Наприклад для найміцнішого із зразків – гематиту, питома енергоємність плазмомеханічного руйнування СБШ-250 знизилась:

- при збільшенні сили струму до 10 А – з 0,575 ГДж/м³ до 0,414 ГДж/м³;

– при збільшенні індуктивності до 35,76 мкГн – з 0,575 ГДж/м³ до 0,355 ГДж/м³.

Структури кальциту та магнезиту зменшують кількість дефектів за рахунок руйнування слабких фракцій, і домінування міцних фракцій. Тому при збільшенні сили струму до 8 А, або при збільшенні індуктивності до 11,92 мкГн, питома енергоємність плазмо-механічного руйнування кварцитів та магнезитів зростає через зміцнення структур.

Таблиця 3.12 – Питомаенергоємність плазмо-механічного руйнування

Структура	Питома енергоємність руйнування СБШ-250, А _v , ГДж/м ³	Зміна параметру блоку плазмового руйнування
	Механічна	
-	0,575	
	Плазмо-механічна	Зміна індуктивності, L, мкГн
Гематит	0,473	11,92
	0,422	23,84
	0,355	35,76
Кварц	0,565	11,92
	0,504	23,84
	0,472	35,76
Кальцит	0,715	11,92
	0,638	23,84
	0,597	35,76
Магнезит	0,809	11,92
	0,722	23,84
	0,675	35,76

Закінчення таблиці 3.12

Структура	Питома енергоємність руйнування СБШ-250, A_v , ГДж/м ³	Зміна параметру блоку плазмового руйнування
Плазмо-механічна		Зміна сили струму, I, А
Гематит	0,473	8
	0,456	9
	0,414	10
Кварц	0,565	8
	0,545	9
	0,496	10
Кальцит	0,715	8
	0,690	9
	0,627	10
Магнезит	0,809	8
	0,780	9
	0,709	10

При силі струму більше 8 А, індуктивності більше 11,92 мкГн, руйнуються міцні фракції кристалічних структур. Відбувається зниження питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування до 10 %, таблиця 3.12. Наприклад для кальциту, питома енергоємність плазмо-механічного руйнування на базі СБШ-250:

- при збільшенні сили струму до 8 А – підвищилась з 0,575 ГДж/м³ до 0,715 ГДж/м³;
- при збільшенні індуктивності до 11,92 мкГн – підвищилась з 0,575 ГДж/м³ до 0,809 ГДж/м³;
- при збільшенні сили струму до 10 А – знизилась з 0,715 ГДж/м³ до 0,627 ГДж/м³;
- при збільшенні індуктивності до 11,92 мкГн – підвищилась з 0,809 ГДж/м³ до 0,675 ГДж/м³.

Визначено, що при руйнуванні структур з модулем пружності I роду від 100 ГПа, раціональним є використання плазмо-механічного руйнування із підвищенням сили струму до 10 А, або підвищенням індуктивності до 35,76 мкГн. При руйнуванні структур з модулем пружності I роду нижче 100 ГПа не рекомендовано використовувати плазмо-механічного руйнування через зміцнення порід плазмовим навантаженням.

За швидкістю буріння визначено добову продуктивність бурових станків, $Q_{\text{Т.ДОБ}}$, м/добу:

$$Q_{\text{Т.ДОБ}} = v_{\text{бур}} \cdot t_{\text{зміни}}, \quad (3.45)$$

де $v_{\text{бур}}$ – швидкість буріння, м/год;

$t_{\text{зміни}}$ – тривалість роботи зміни, год.

Швидкість буріння оберненопропорційно залежить від коефіцієнту складності буріння [98]:

$$v_{\text{бур}} = \frac{2,5 \cdot F_0 \cdot n_{\text{в}}}{\Pi_6 \cdot d_{\text{к}}^2 \cdot P_{\text{пит}}}, \quad (3.46)$$

де F_0 – осьове зусилля на долото, Н;

$n_{\text{в}}$ – швидкість обертання долота, м/год;

Π_6 – коефіцієнт складності буріння, в.о.;

$d_{\text{д}}$ – діаметр свердловини, м;

$P_{\text{пит}}$ – тиск на поверхню ґрунту, Па.

Визначено емпіричний коефіцієнт складності буріння, який враховує коефіцієнт тріщинуватості гірської породи [98]:

$$\Pi_6 = 0,05 \cdot (K_{\text{Т}} \cdot (3 \cdot \sigma_{\text{стисн}}) + \rho \cdot g), \quad (3.47)$$

де $K_T = 0,85$ – коефіцієнт тріщинуватості гірської породи, в.о.;

$\sigma_{\text{стисн}} = E \cdot \varepsilon$ – границя міцності на стиснення, Па;

E – модуль пружності I роду, Па;

ε – відносне видовження, в.о.;

$g = 9,8$ – прискорення вільного падіння, м/с².

Так як $P_6 = f(\sigma_{\text{стисн}})$ [98], а $\sigma_{\text{стисн}} = f(E)$ [77], то $P_6 = f(E)$. За (3.39) $P_6 = f(I, L)$. У таблиці 3.13 наведено залежність добової продуктивності плазмо-механічного руйнування від зміни сили струму та індуктивності.

Таблиця 3.13 – Залежність добової продуктивності плазмо-механічного руйнування від зміни сили струму та індуктивності

Структура	Добова продуктивність СБШ-250, $Q_{\text{т.доб.}}$, м/добу	Зміна параметру блоку плазмового руйнування
Плазмо-механічна		Зміна індуктивності, L, мкГн
Гематит	15,20	0
	18,53	11,92
	21,45	23,84
	23,25	35,76
Кварц	2,63	0
	2,72	11,92
	3,39	23,84
	3,85	35,76
Кальцит	43,40	0
	23,76	11,92
	28,28	23,84
	31,15	35,76
Магнезит	15,55	0
	5,94	11,92
	7,37	23,84
	8,36	35,76

Закінчення таблиці 3.13

Структура	Добова продуктивність СБШ-250, $Q_{т.доб}$, м/добу	Зміна параметру блоку плазмового руйнування
Плазмо-механічна		Зміна сили струму, I, А
Гематит	15,20	0
	18,53	8
	19,42	9
	21,93	10
Кварц	2,63	0
	2,72	8
	2,91	9
	3,51	10
Кальцит	43,40	0
	23,76	8
	25,11	9
	29,03	10
Магнезит	19,55	0
	5,94	8
	6,35	9
	7,55	10

При підвищенні сили струму до 10 А, добова продуктивність СБШ-250 при руйнуванні гематитів зростає на 44 % з 15,20 м/добу до 21,93 м/добу. Це пов'язано із зниженням модулю пружності I роду через знеміцнення гірської породи плазмовою складовою. При підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн, добова продуктивність СБШ-250 при руйнуванні гематитів зростає на 52 % з 15,20 м/добу до 23,25 м/добу. При руйнуванні кварцу, добова продуктивність СБШ-250 зростає аналогічно з 2,63 м/добу до 3,51 м/добу при підвищенні сили струму до 10 А, та з 2,63 м/добу до 3,85 м/добу при підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн.

При підвищенні сили струму до 10 А та індуктивності до 35,76 мкГн, добова продуктивність руйнування кальцитів та магнезитів знижується більше ніж на 30 %, таблиця 3.13. Це пов'язано з тим, що структури кальциту та магнезиту зменшують кількість дефектів за рахунок руйнування слабких фракцій, і домінування міцних фракцій. У кальциті це відбувається за рахунок шарніроподібних структур, що

мають властивості розтягуватись та збільшувати параметр кристалічної решітки до 10 %. Магnezит при збільшенні температури від плазмового навантаження – кристалізується. Тому, добова продуктивність плазмо-механічного руйнування кальцитів та магнезитів знижується.

Визначено, що при руйнуванні структур з модулем пружності I роду від 100 ГПа, раціональним є використання плазмо-механічного руйнування із підвищенням сили струму до 10 А, або підвищенням індуктивності до 35,76 мкГн. При руйнуванні структур з модулем пружності I роду нижче 100 ГПа не рекомендовано використовувати плазмо-механічного руйнування через зміцнення порід плазмовим навантаженням.

РОЗДІЛ 4

ПЛАЗМО-МЕХАНІЧНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

4.1. Підготовка дослідницької апаратури і зразків гірських порід

В якості зразків для проведення експериментальних досліджень прийнято гематит, кварц, кальцит, магнезит. Гематит є одним з основних рудних мінералів [43]. Кременій є другим за поширеністю елементом, на Землі, що входить до кварцових структур [44]. Кальцит є одним з найрозповсюдженіших мінералів на Землі [45]. Магнезит обрано через поширеність його використання у виробництві будівельних матеріалів, кераміки, скла тощо [46].

Підготовка зразків виконувалась відповідно рекомендацій [107] із використанням системи шліфування PetroThin, Buehler [108]. Специфікація та принцип роботи у додатку А. Залежність глибини відбитку від сили вдавлювання індентора неруйнуючим впливом перевірялась мікротвердоміром Larey technologys МН-II. Точку дотику при першому зареєстрованому контакті індентора із зразком обрано за нульову. Цикли вимірювань проведено з постійною швидкістю навантаження 5мкм/10 сек, відповідно до специфікації обладнання, додаток А. Для зниження вібрацій, мікротвердомір механічно закріплений. У приміщенні підтримувалися температура 292 К та відносна вологість – 60 % відповідно до [109]. Мікроскопічна зйомка поверхонь зразків ГП проведено растровим електронним мікроскопом РЭМ-106И. Він дозволив фіксувати тріщини шириною 1мкм у зразках з похибкою 40 нм і забезпечив збільшення від 15 до 100000 разів, додаток А. Проведено сканування поверхонь зразків сфокусованим електронним потоком з електронної пушки растрового електронного мікроскопу. Зображення об'єкта, що досліджується, змінюється в результаті взаємодії потоку електронів з поверхнею зразка. Кожну точку зразка послідовно опромінено сфокусованим електронним потоком, який переміщувався по досліджуваній поверхні із кроком 25 мкм [110, 111].

Для експериментальних досліджень ослаблення кристалічних структур ГП потоком індуктивної плазми, створено лабораторний стенд, рисунок 4.1.



Рисунок 4.1 – Лабораторний стенд для експериментальних досліджень: 1 – котушки індуктивності, 2 – розрядники, 3 – з'єднувальні дроти, 4 – трансформатор високовольтний

Високовольтний трансформатор 4 підвищує вхідну напругу з 127 В при максимальному коефіцієнті перетворення 295 в. о. з можливістю регулювання напруги розрядного контуру. Котушки індуктивності 1 з'єднані з одним із високовольтних виводів трансформатора дротами 3. Спеціальна конструкція розрядників дозволяє регулювати відстань між ними від 0 до 300 мм. На плоский розрядник механічно кріпиться експериментальний зразок. Між розрядниками 2 формується потік індуктивної плазми. При включенні лабораторного стенду, потік індуктивної плазми пробиває повітряний проміжок, рисунок 4.2, і з'єднується із другим розрядником, руйнуючи зразок ГП.

Напруга від мережі регулюється автотрансформатором з вольтметром Э30 за ГОСТ 8711-93 [112]. Його клас точності становить 1,5. Шкала вольтметра знаходиться в межах від 0 до 150 В. Ціна поділки 5 В [112]. Напруга від автотрансформатора для підвищення точності вимірюється вольтметром Э515/2,

класом точності 0,5 за ГОСТ 8711-93 [112]. Він призначений для роботи на частотах від 40 до 400 Гц.

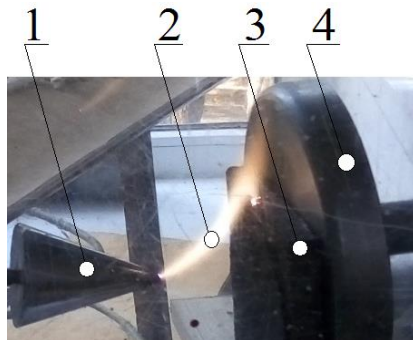


Рисунок 4.2 – Руйнування зразка ГП каналом плазми між розрядниками лабораторного стенду, де 1 – розрядник голчастий, 2 – канал індуктивної плазми, 3 – зразок ГП, 4 – розрядник плаский

Температура стабільної роботи вольтметра від 283 до 308 К. Відносна вологість допускається до 80 %. Маса приладу 1,2 кг. Габарити становлять 140×195×92 мм. Діапазон вимірювань від 0 до 150 В. Ціна поділки – 1 В [112]. Сила струму від джерела вимірюється амперметром Э365-1, класом точності 1,5 за ГОСТ 8711-93 [112]. Робоча частота 50 Гц. Температура стабільної роботи амперметра може коливатись від 233 до 323 К. Відносна вологість допускається до 95 %. Маса приладу 0,5 кг. Габарити становлять 120×120×50 мм. Діапазон вимірювань від 0 до 20 А. Ціна поділки – 1 А [112]. Для підвищення напруги, використовується трансформатор підвищувальний Med S 33b, виробництво Spannung, Німеччина. Він має 18 рівнів підвищення напруги, при яких коефіцієнти трансформації змінюються від 135 до 295 в. о. Бак Med S 33b заповнений маслом, що забезпечує охолодження та ізоляцію обмоток трансформатора. На верхню частину баку винесено низьковольтні вводи у вигляді клемної колодки для зміни коефіцієнту трансформації та два високовольтні виводи, ізольованих від баку трансформатора порцеляновими прохідними ізоляторами. Фільтр для згладжування синусоїди на вході високовольтного трансформатора виконаний на базі конденсатора КБГ-МП

2В-к, ГОСТ 6118-59 [113]. Ємність конденсатора $2 \times 0,5$ мкФ плюс – мінус 10 %. Напруга пробою конденсатора 600 В [113]. Час проведення експерименту, час руйнування породи індуктивною плазмою вимірюється електросекундоміром ПВ-53Щ за ГОСТ 8.286-78 [114]. Номінальна напруга живлення приладу – 110 В та 220 В. Номінальна частота 50 Гц. Діапазон вимірювань від 0 с до 10 с з ціною поділки 0,1 с. Напрацювання на відмову складає 1000 год. Умови експлуатації – температура від 253 К до 323 К, відносна вологість до 80 % [114]. Розміщення приладів на стенді експериментальних досліджень наведено на рисунку 4.3.

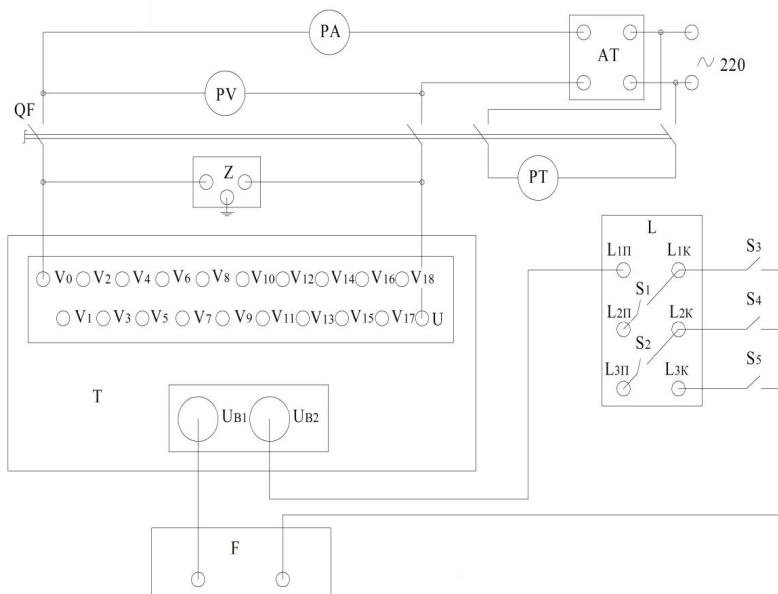


Рисунок 4.3 – Схема монтажна з'єднань стенду експериментальних досліджень: АТ – автотрансформатор; QF – вимикач; Z – фільтр; Т – трансформатор високовольтний; L – котушка індуктивності; F – розрядник; PA – амперметр; PV – вольтметр; PT – електросекундомір; U, V₀ – V₁₈ – клеми підключення низької сторони трансформатора високовольтного; U_{B1} та U_{B2} – клеми підключення високої сторони трансформатора високовольтного; L_{1П} – L_{3П} та L_{1К} – L_{3К} – відповідно, клеми підключення початку та кінця трьох котушок індуктивності; S₁ – S₅ – ключі управління індуктивності

При проведенні досліджень ослаблення кристалічних структур ГП індуктивною плазмою із зміною індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, запропоновано систему електричних ключів S_n , рисунок 4.3. При вмиканні котушки індуктивності (L_1), замикається контакт S_3 . При цьому S_1 , S_2 , S_4 та S_5 розімкнені. Для підключення двох котушок індуктивності послідовно (L_1 , L_2), S_1 та S_4 замкнено, а S_2 , S_3 та S_5 розімкнені. Дослідженні із трьома послідовно включеними котушками індуктивності (L_1 , L_2 , L_3) передбачає замкнені S_1 , S_2 та S_5 , а S_3 та S_4 – розімкнені.

4.2. Вплив індуктивної плазми на гірські породи

Відповідно до ISO 14577 [115], перед руйнуванням проведено аналіз зразків методом індентування для визначення їх характеристик (сила вдавлювання індентора P , глибина відбитку h). За ISO 14577 виділено три діапазони індентування: макро- ($2 \text{ Н} \leq P \leq 30 \text{ кН}$), мікро- ($P < 2 \text{ Н}$, $h > 20 \text{ нм}$) і нано- ($h \leq 20 \text{ нм}$) [115]. Метод мікроіндентування реалізовано прикладенням мікронавантаження від 0 до 1,45 Н до атестованого зонду і прецизійним вимірюванням деформації матеріалу порядку 1 нм. Метод придатний для з'ясування закономірностей поведінки матеріалів - від м'яких біологічних до надтвердих алмазоподібних [115]. Перед ослабленням кристалічних структур потоком індуктивної плазми, неруйнівним методом мікроіндентування встановлено залежності сили вдавлювання індентора від глибини відбитку, які мають параболічний характер. Експериментальні зразки гематиту, кварцу, кальциту, магнезиту перевірено на міцність. Для гематиту залежність сили вдавлювання від глибини відбитку індентора змінюється у межах від 0 до 1,45 Н, рисунок 4.4. Інші зразки перевірено аналогічно, результати у таблицях 4.1 – 4.8.

На рисунку 4.4 зображено криві навантаження та розвантаження гематиту пірамідальним індентором із 6 гранями. Графік має дві характерні ділянки. Перша – при збільшенні глибини відбитку до 14,174 мкм, сила вдавлювання змінюється лінійно до 0,58 Н. Під час навантаження, кінетична енергія індентора переходить у потенційну енергію кристалічних структур гематиту та накопичується у ядрі

ущільнення. Ядро фокусується у структурі гематиту під голкою індентора. Сила вдавлювання збільшується з 0,07 Н до 1,45 Н через зміну геометрії індентора, внаслідок збільшення об'єму ядра ущільнення. В гематит вдавлюється не індентор, а ядро ущільнення.

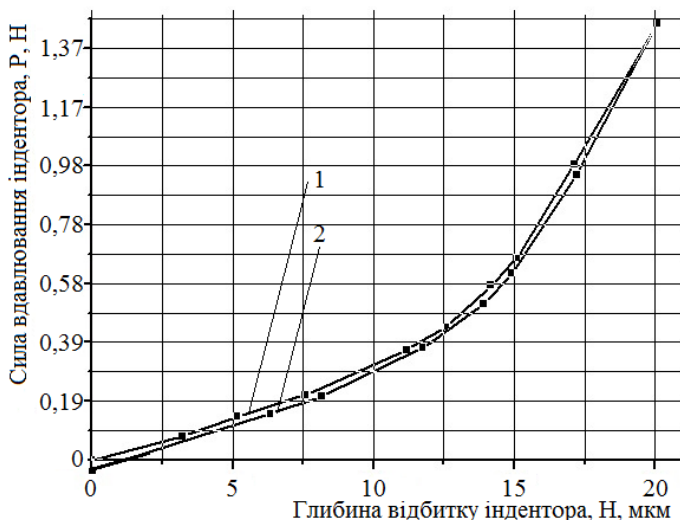


Рисунок 4.4 – Залежність сили вдавлювання індентора від його глибини відбитку для гематиту до руйнування, де 1 – крива навантаження, 2 – крива розвантаження

Друга ділянка – при зміні глибини відбитку з 14,174 мкм до 20,081 мкм, сила вдавлювання змінюється лінійно від 0,58 Н до 1,45 Н.

Крива розвантаження має дві аналогічні ділянки. Перша - при зменшенні глибини відбитку з 20,081 мкм до 14,910 мкм, сила вдавлювання зменшується лінійно з 1,45 Н до 0,62 Н. Друга ділянка – при зменшенні глибини відбитку нижче 14,910 мкм гематит проявляє пружні властивості. При зниженні навантаження, його поверхня повертається у початкову форму. При зменшенні глибини відбитку з 14,910 мкм до 0,131 мкм, сила вдавлювання зменшується лінійно з плюс 0,62 Н до мінус 0,03 Н. Від’ємне значення сили вдавлювання виникає через передачу частини накопиченої надлишкової внутрішньої енергії пороною до індентора. Пружні сили

виштовхують індентор з поверхні гематиту із силою 0,03 Н. Кінцева глибина відбитку після розвантаження склала 0,131 мкм.

Кристалічні структури експериментальних зразків ГП ослаблено потоком індуктивної плазми при зміні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн та сили струму з 8 А до 10 А. Після проведення серії дослідів експериментальні зразки перевірено методом мікроіндентування на зміну міцності за матрицею планування експерименту, таблиця 2.5. У таблицях 4.1 та 4.2 наведено залежності сили вдавлювання індентора від глибини відбитку для гематиту до та після руйнування при зміні сили струму та зміні індуктивності, відповідно.

Таблиця 4.1 - Залежність сили вдавлювання індентора від глибини відбитку для гематиту до та після руйнування при зміні сили струму

До руйнування		Після руйнування – сила струму, I _m , А					
		8		9		10	
Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм
0	0	0	0	0	0	0	0
0,07	3,222	0,06	2,220	0,06	2,220	0,06	2,220
0,14	5,145	0,15	5,448	0,16	5,236	0,17	4,438
0,21	7,574	0,21	6,780	0,21	6,780	0,25	6,099
0,36	11,181	0,32	9,198	0,32	9,198	0,36	8,227
0,44	12,583	0,48	12,332	0,48	12,332	0,52	11,620
0,58	14,174	0,57	13,612	0,55	13,609	0,61	13,346
0,67	15,099	0,66	15,226	0,65	15,474	0,75	15,935
0,98	17,128	0,92	19,170	0,90	19,591	1,12	25,178
1,45	20,081	1,25	23,772	1,28	26,633	1,26	30,027
0,95	17,220	0,95	21,400	0,94	23,511	0,93	26,041
0,62	14,910	0,59	15,749	0,58	17,799	0,48	19,057
0,52	13,921	0,50	14,375	0,47	15,540	0,37	16,797
0,37	11,744	0,36	12,097	0,34	12,483	0,20	13,543
0,21	8,152	0,22	8,916	0,20	9,221	0,10	9,492
0,15	6,337	0,11	6,398	0,08	6,501	0,04	6,632
-0,03	0,131	-0,03	0,131	-0,03	0,131	-0,03	0,131

При підвищенні сили струму з 8 А до 10 А, відбувається додавання штучної дефектності потоком індуктивної плазми до існуючої природної. Це забезпечує знеміцнення кристалічних структур ГП. Енерговитрати на руйнування знижуються до 30 %, дивись підрозділ 4.3. Максимальна глибина відбитку на кривій розвантаження збільшилась з 20,081 мкм до 30,027 мкм. Це пояснюється тим, що

при збільшенні енергії потоку індуктивної плазми з 0,2692 ПДж до 1,075 ПДж, зростає передача її кристалічній структурі гематиту. Руйнуються внутрішні зв'язки структури ГП через субрезонансні коливання. Виникає штучна дефектність, яка знижує удвічі з 0,07 Н/мкм до 0,04 Н/мкм питому силу вдавлювання індентора.

Таблиця 4.2 - Залежність сили вдавлювання індентора від глибини відбитку для гематиту до та після руйнування при зміні індуктивності

До руйнування		Після руйнування – індуктивність, L, мкГн					
		11,92		23,84		35,76	
Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм
0	0	0	0	0	0	0	0
0,08	3,222	0,07	2,220	0,07	2,220	0,07	2,220
0,14	5,145	0,16	5,448	0,16	5,236	0,16	4,373
0,22	7,574	0,21	6,780	0,21	6,780	0,25	6,099
0,37	11,181	0,33	9,198	0,33	9,198	0,33	8,161
0,44	12,583	0,49	12,332	0,49	12,332	0,47	10,750
0,58	14,174	0,57	13,612	0,57	13,609	0,61	13,543
0,67	15,099	0,67	15,226	0,68	15,540	0,76	16,534
0,99	17,128	0,92	19,170	1,12	25,178	1,03	21,522
1,46	20,081	1,25	23,772	1,27	29,763	1,20	29,647
0,95	17,220	0,95	21,400	0,91	26,370	0,99	24,110
0,62	14,910	0,59	15,749	0,51	18,860	0,54	17,865
0,52	13,921	0,50	14,375	0,38	16,732	0,40	15,269
0,37	11,744	0,37	12,097	0,23	13,346	0,24	12,081
0,21	8,152	0,22	8,916	0,11	9,492	0,13	8,563
0,15	6,337	0,11	6,398	0,05	6,632	0,07	5,236
-0,03	0,131	-0,03	0,131	-0,03	0,131	-0,03	0,131

При підвищенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, внесена штучна дефектність знизилася питому силу вдавлювання індентора удвічі з 0,07 Н/мкм до 0,04 Н/мкм, що на 3,4 % більше, ніж при збільшенні сили струму з 8 А до 10 А. Це відбулось через нелінійність процесу руйнування індуктивною плазмою. При збільшенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, енергія потоку індуктивної плазми знизилась з 0,269 ПДж до 0,089 ПДж, таблиця 3,4, через індуктивний опір енергетичному імпульсу плазми. Частота власних кругових коливань плазми знизилась з $0,591 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ до $0,537 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, таблиця 3.2. При наближенні коефіцієнта

субрезонанса до нуля, таблиця 3.11, виникають асиметричні субрезонанси. Тому питома сила вдавлювання індентора 0,04 Н/мкм на 3,4 % більше, ніж при збільшенні сили струму з 8 А до 10 А.

Перед ослабленням зразка гематиту потоком індуктивної плазми, зафіксовано плоска однорідна структура зразка, з шорсткістю не більше 35 мкм, без вкраплень іншого матеріалу, рисунок 4.5. Проявлена природна тріщинуватість у вигляді границі 3 між шарами. Поверхня шарів рівна, включення не спостерігається.

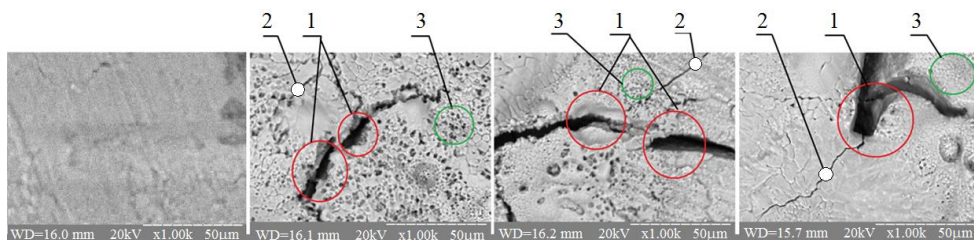


Рисунок 4.5 – Поверхня гематиту до та після руйнування плазмою, із збільшенням $\times 1000$ крат, зліва праворуч: фрагменти 1й – до руйнування; 2й та 3й – сила струму 10 А, індуктивність 11,92 мкГн; 4й – сила струму 8 А, індуктивність 35,72 мкГн, де 1 – каверни ліній впливу субрезонансної складової, 2 – струмкові тріщини, 3 – кратери, як результат впливу температурної складової; WD – відстань між об’єктивом мікроскопа та поверхнею зразка у камері для зразків в мм; 20.00 kV – прискорююча напруга РЭМ-106И; $\times 1.00$ k – збільшення, крат; 50 μm – показчик шкали на знімку структури у мкм

Після ослаблення зразка потоком індуктивної плазми, рисунок 4.5, на зразку гематиту спостерігаються границі її впливу. Вони окреслені зміною геометрії поверхневого шару під впливом температурної складової 3 потоку індуктивної плазми. За допомогою растрового електронного мікроскопа РЭМ-106И зафіксовано три фрагменти впливу потоку індуктивної плазми. На фрагментах зафіксоване нерівномірне підняття поверхні. Це призвело до враження зразку штучною тріщинуватістю. На зразках зафіксована поява кратерів 3 овальної та круглої форм,

діаметром від 50 мкм до 250 мкм. Це пояснюється дією температурної складової каналу індуктивної плазми. Коливання потоку плазми увійшли у субрезонанс із коливаннями кристалічних структур зразка гематиту, що зруйнувало мікроструктуру зразка, розірвавши когезійні зв'язки. На рисунку 4.5 наведено ослаблення гематиту потоком індуктивної плазми, збільшення $\times 1000$ крат. Зафіксовано каверни 1 товщиною від 25 мкм до 150 мкм від впливу субрезонансної складової потоку індуктивної плазми. Ці каверни утворились внаслідок того, що коливання потоку індуктивної плазми увійшли в асиметричний субрезонанс із коливаннями кристалічних структур гематиту. Через руйнування когезійних зв'язків, частина структур випарувалась. Від кінців каверн по поверхні розходяться струмкові тріщини 2. Вони поширюють концентровану у вершинах внутрішню енергію. Таким чином додається штучна дефектність до існуючої природної, знижуючи питому енергоємність руйнування до 30 %, підрозділ 4.3. По берегах тріщини спостерігаються кратери круглої форми 3, діаметром до 5 мкм. Вони утворилися внаслідок впливу температурної складової потоку індуктивної плазми на верхній шар гематиту. Отже, при ослабленні кристалічних структур потоком індуктивної плазми спостерігається вплив двох типів:

- температурний – передається кінетична енергія потоку індуктивної плазми і поширюється у кристалічних структурах гематиту;
- субрезонансний – вивільнюється внутрішня енергія кристалічних структур при субрезонансних коливаннях потоку індуктивної плазми.

Аналогічно проведено ослаблення кристалічних структур відповідно при зміні сили струму та індуктивності:

- кварцу – таблиці 4.3 та 4.4;
- кальциту – таблиці 4.5 та 4.6;
- магнезиту – таблиці 4.7 та 4.8.

Таблиця 4.3 - Залежність сили вдавлювання індентора від глибини відбитку для кварцу до та після руйнування при зміні сили струму

До руйнування		Після руйнування – сила струму, I_m , А					
		8		9		10	
Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм
0	0	0	0	0	0	0	0
0,08	2,627	0,05	2,968	0,05	2,968	0,05	2,935
0,13	6,145	0,13	4,454	0,13	4,464	0,13	4,455
0,21	10,174	0,21	7,678	0,21	7,378	0,21	7,675
0,28	13,426	0,33	10,487	0,33	10,846	0,33	10,452
0,36	15,583	0,40	13,678	0,41	13,767	0,41	13,453
0,52	17,174	0,56	15,345	0,56	15,378	0,56	15,348
0,59	18,099	0,64	16,378	0,59	16,455	0,64	16,788
0,83	19,128	0,73	17,877	0,67	17,645	0,73	17,782
1,07	26,728	0,93	24,153	0,89	24,621	0,85	27,074
0,85	19,010	0,75	17,877	0,66	17,758	0,75	17,725
0,51	17,712	0,55	16,786	0,55	16,687	0,56	16,678
0,43	16,526	0,46	13,875	0,46	13,674	0,46	13,784
0,31	14,242	0,33	10,544	0,33	10,434	0,33	10,458
0,15	8,128	0,16	5,212	0,16	5,128	0,16	5,245
0,10	4,126	0,11	4,121	0,10	4,121	0,11	4,057
-0,03	0,113	-0,03	0,113	-0,03	0,113	-0,03	0,113

Аналогічно гематиту, при підвищенні сили струму з 8 А до 10 А, додавання штучної дефектності потоком індуктивної плазми до існуючої природної забезпечує ослаблення кристалічних структур. Максимальна глибина відбитку на кривій розвантаження збільшилась з 26,728 мкм до 27,074 мкм. Руйнуються зв'язки кристалічних структур зразка через субрезонансні коливання. Виникає штучна дефектність, через яку, питома сила вдавлювання індентора знижується на 21 % з 0,04 Н/мкм до 0,03 Н/мкм, аналогічно структурам гематиту.

Таблиця 4.4 - Залежність сили вдавлювання індентора від глибини відбитку для кварцу до та після руйнування при зміні індуктивності

До руйнування		Після руйнування – індуктивність, L, мкГн					
		11,92		23,84		35,76	
Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм
0	0	0	0	0	0	0	0
0,08	2,627	0,05	2,956	0,05	2,956	0,03	5,964
0,13	6,145	0,13	4,536	0,13	4,343	0,13	7,427
0,21	10,174	0,21	7,568	0,21	7,647	0,20	9,364
0,28	13,426	0,33	10,652	0,34	10,652	0,29	16,064
0,36	15,583	0,40	13,638	0,40	13,638	0,36	16,264
0,52	17,174	0,55	15,356	0,54	15,437	0,51	17,861
0,59	18,099	0,64	16,234	0,64	16,234	0,59	19,034
0,83	19,128	0,73	17,321	0,72	17,524	0,67	24,358
1,07	26,728	0,93	24,153	0,84	25,866	0,80	27,645
0,85	19,010	0,75	17,123	0,75	17,142	0,63	24,346
0,51	17,712	0,55	16,842	0,53	16,575	0,57	18,667
0,43	16,526	0,45	13,624	0,45	13,482	0,41	14,765
0,31	14,242	0,33	10,421	0,32	10,252	0,30	11,846
0,15	8,128	0,16	5,213	0,16	5,125	0,14	9,064
0,10	4,126	0,11	4,126	0,10	4,374	0,09	6,935
-0,03	0,113	-0,03	0,113	-0,03	0,113	-0,03	0,113

Аналогічно гематиту, при підвищенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, внесена штучна дефектність знизила питому силу вдавлювання індентора з 0.04 Н/мкм до 0.03 Н/мкм. Аналогічно структурам гематиту, питома сила вдавлювання індентора у зразок кварцу при зміні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн на 8,1 % нижча, ніж при зміні сили струму з 8 А до 10 А через зниження коефіцієнту субрезонансу, таблиця 3.11. Коефіцієнт субрезонансу лінійно залежить від частоти коливань потоку індуктивної плазми, що змінюється з $0,591 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ до $0,53 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, таблиця 3.2. При ослабленні структур кварцу коефіцієнт субрезонансу на 0,1 % менше, ніж при ослабленні кристалічних структур гематиту. Тому, питома сила вдавлювання індентора нижча на 28,6 % у кварцу при зміні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, ніж у гематиту.

На рисунку 4.6 наведено порівняння власних досліджень впливу потоку індуктивної плазми на кварц (фрагменти 2,3) із впливом плазми у газі на кварц, які зафіксовані іншими дослідниками [116] (фрагмент 4).

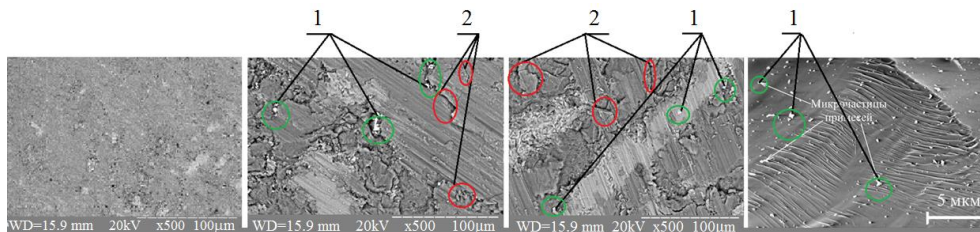


Рисунок 4.6 – Поверхня кварцу до та після руйнування плазмою, збільшення $\times 500$ крат, зліва праворуч: фрагменти 1й – до руйнування; 2й – сила струму 10 А, індуктивність 11,92 мкГн; 3й – сила струму 8 А, індуктивність 35,72 мкГн, 4й – збагачений кварц потоком плазми у газі [116], де 1 – вихід на поверхню мікродомішок під впливом температурної складової, 2 – каверни від впливу субрезонансної складової; WD – відстань між об’єктивом мікроскопа та поверхнею зразка у камері для зразків в мм; 20.00 kV – прискорююча напруга РЭМ-106И; $\times 1.00$ k – збільшення, крат; 50 μm – показчик шкали на знімку структури, мкм

Підтверджено, що під впливом температурної складової потоку плазми виникає вихід на поверхню мікродомішок 1 на фрагментах 2-4, рисунок 4.6. Проведено порівняння з результатами дослідження інших авторів – фрагмент 4й, поверхня кварцу при руйнуванні його потоком плазми у газі [116]. На другому і третьому фрагментах спостерігаються аналогічні утворення при ослабленні структур індуктивною плазмою. Це підтверджує внесення штучних дефектностей при виході зі структури домішкових фракцій. Фрагмент 4й знаходився під впливом ємнісної плазми у газі із регуляцією температурного режиму. Проте був відсутній субрезонансний вплив. На другому і третьому фрагментах виникли каверни 2. Їх товщина знаходиться у межах 2 мкм, що до 100 разів менше, ніж на зразках гематиту. Це пояснюється меншою на 2 порядки кількістю природної дефектності. Проте їх заповнення поверхні фрагменту на 30 % більше. Це пояснюється нижчим

коефіцієнтом субрезонансу, таблиця 3.11. Виникають асиметричні субрезонанси між коливаннями потоку індуктивної плазми та коливаннями кристалічних структурами кварцу. Таким чином додається штучна дефектність до існуючої природної, що також до 30 % знижує питому енергоємність руйнування. При ослабленні кристалічних структур кварцу потоком індуктивної плазми спостерігається вплив двох типів – температурний і субрезонансний, аналогічно із гематитом.

Таблиця 4.5 - Залежність сили вдавлювання індентора від глибини відбитку для кальциту до та після руйнування при зміні сили струму

До руйнування		Після руйнування – сила струму, I_m , А					
		8		9		10	
Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм
0	0	0	0	0	0	0	0
0,07	5,378	0,07	2,122	0,07	2,124	0,06	2,127
0,17	8,618	0,15	3,784	0,15	5,786	0,15	4,387
0,26	11,572	0,23	5,632	0,20	6,854	0,24	5,134
0,41	14,438	0,35	7,934	0,36	9,421	0,31	7,315
0,50	16,487	0,45	9,548	0,52	11,454	0,39	10,784
0,55	18,487	0,59	11,787	0,74	13,576	0,47	13,824
0,61	20,434	0,80	13,485	0,95	16,785	0,85	17,452
0,66	25,058	0,96	16,784	1,10	17,845	1,02	21,242
0,98	36,547	1,33	21,653	1,36	23,848	1,24	26,442
0,65	24,845	0,95	15,385	1,08	17,786	1,01	20,334
0,59	19,784	0,79	12,677	0,93	16,860	0,79	17,035
0,53	15,482	0,57	10,277	0,67	16,732	0,56	13,312
0,48	12,786	0,45	8,547	0,34	13,346	0,32	10,517
0,38	10,782	0,35	7,056	0,11	9,492	0,24	6,345
0,21	6,782	0,14	4,354	0,04	6,632	0,05	4,435
-0,04	0,237	-0,04	0,237	-0,04	0,237	-0,04	0,237

Кальцит належить до групи ауксетиків [84]. При підвищенні сили струму до 8 А, шарніроподібні кристалічні структури розширюються перпендикулярно прикладеному навантаженню [84]. При цьому змінюється міра ангармонізму міжатомних коливань слабких фракцій [85]. Експериментально доведено [86], що зростання параметру кристалічної решітки до 0,5 % відбувається через розширення кристалічних структур, при розтягненні їх зв'язків. При цьому збільшується

амплітуда коливань кристалічних структур, а отже знижується частота. Коефіцієнт субрезонансу збільшується, а кристалічна структура зміцнюється. Це відбувається за рахунок руйнування слабких фракцій. Дефектність знижується. Питома сила вдавлювання зростає з 0,03 Н/мкм до 0,06 Н/мкм. Анггармонізм міжатомних коливань міцних фракцій не змінювався. При збільшенні сили струму з 8 А до 10 А, питома сила вдавлювання індентора знижується з 0,06 Н/мкм до 0,04 Н/мкм. Питома сила вдавлювання підвищилась на 56,9 % від початкових значень.

Аналогічно при збільшенні індуктивності до 11,92 мкГн, таблиця 4.6, змінюється міра ангармонізму міжатомних коливань слабких фракцій.

Таблиця 4.6 - Залежність сили вдавлювання індентора від глибини відбитку для кальциту до та після руйнування при зміні індуктивності

До руйнування		Після руйнування – індуктивність, L, мкГн					
		11,92		23,84		35,76	
Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм
0	0	0	0	0	0	0	0
0,07	5,378	0,07	2,122	0,08	2,122	0,07	2,432
0,17	8,618	0,15	3,784	0,20	5,453	0,13	3,482
0,26	11,572	0,23	5,248	0,32	6,824	0,24	5,245
0,41	14,438	0,35	7,934	0,41	8,854	0,38	7,134
0,50	16,487	0,46	9,548	0,48	10,528	0,51	10,827
0,55	18,487	0,59	11,844	0,59	12,454	0,64	12,875
0,61	20,434	0,80	13,485	0,71	15,524	0,77	14,785
0,66	25,058	0,96	16,784	0,90	17,458	0,88	20,825
0,98	36,547	1,33	21,653	1,16	23,358	1,06	24,554
0,65	24,845	0,95	15,483	0,89	17,054	0,87	18,483
0,59	19,784	0,79	12,782	0,70	15,245	0,73	15,782
0,53	15,482	0,57	10,531	0,58	12,115	0,51	13,737
0,48	12,786	0,45	8,511	0,46	10,054	0,30	9,487
0,38	10,782	0,35	7,115	0,40	9,457	0,14	5,784
0,21	6,782	0,14	4,453	0,16	4,483	0,08	4,785
-0,04	0,237	-0,04	0,237	-0,04	0,237	-0,04	0,237

Через розширення кристалічних структур, збільшується амплітуда їх коливань і знижується частота. Коефіцієнт субрезонансу збільшується за рахунок руйнування слабких фракцій, а кристалічна структура зміцнюється. Питома сила вдавлювання

зростає з 0,03 Н/мкм до 0,06 Н/мкм. При зміні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, руйнуються міцні фракції кристалічних структур. Їх параметр кристалічної решітки збільшується до 0,5 % [86]. Коефіцієнт субрезонансу наближається до нуля. При збільшенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, кристалічні структури кальциту ослаблюються. Питома сила вдавлювання індентора знижується на 29 % з 6,246·0,0098 Н/мкм до 4,406·0,0098 Н/мкм. На рисунку 4.7 наведено поверхню кальциту до та після руйнування плазмою.

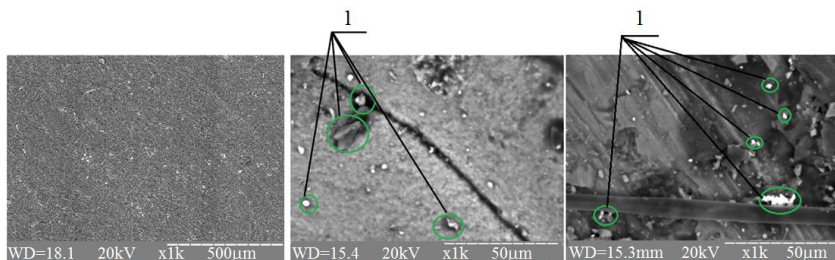


Рисунок 4.7 – Поверхня кальциту до та після руйнування плазмою, збільшення $\times 1000$ крат, зліва праворуч: фрагменти 1й – до руйнування; 2й – сила струму 10 А, індуктивність 11,92 мкГн; 3й – сила струму 8 А, індуктивність 35,72 мкГн; де 1 – вихід на поверхню мікродомішок під впливом температурної складової; WD – відстань між об'єктивом мікроскопа та поверхнею зразка у камері для зразків в мм; 20.00 kV – прискорююча напруга РЕМ-106И; $\times 1.00$ k – збільшення, крат; 50 μm – показчик шкали на знімку структури, мкм

Під впливом температурної складової потоку плазми спостерігається вихід на поверхню мікродомішок 1. Це відбувається внаслідок руйнування слабких фракцій. При підвищенні сили струму до 8 А, шарніроподібні кристалічні структури розширюються. При цьому змінюється міра ангармонізму міжатомних коливань слабких фракцій [85]. Параметр кристалічної решітки зростає до 0,5 % [86] через розширення кристалічних структур, при розтягненні їх зв'язків. Збільшується амплітуда коливань кристалічних структур, а отже знижується частота. Коефіцієнт субрезонансу збільшується до $7,08 \cdot 10^{-9}$ в. о., а кристалічна структура зміцнюється через випадення дефектних структур і збільшення коефіцієнту міцних фракцій.

Таблиця 4.7 - Залежність сили вдавлювання індентора від глибини відбитку для магнезиту до та після руйнування при зміні сили струму

До руйнування		Після руйнування – сила струму, I_m , А					
		8		9		10	
Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм
0	0	0	0	0	0	0	0
0,08	6,377	0,06	2,034	0,06	2,234	0,07	2,042
0,23	8,348	0,17	3,468	0,14	5,668	0,15	3,859
0,32	10,743	0,24	5,137	0,21	6,975	0,26	5,457
0,40	12,534	0,36	7,615	0,35	9,024	0,33	8,334
0,47	15,387	0,55	9,344	0,53	11,415	0,41	10,827
0,53	21,855	0,71	11,234	0,75	13,484	0,50	14,054
0,59	27,845	0,82	13,784	0,94	16,574	0,84	17,345
0,63	31,847	0,98	15,447	1,11	17,844	1,02	20,454
0,81	46,734	1,32	21,846	1,33	23,986	1,23	25,531
0,62	31,543	0,96	15,127	1,09	17,056	0,99	19,424
0,54	22,452	0,81	10,387	0,91	16,833	0,82	16,424
0,46	14,544	0,63	7,648	0,64	16,034	0,58	12,248
0,34	11,374	0,45	6,153	0,35	14,534	0,34	9,834
0,27	8,457	0,32	5,838	0,10	9,257	0,26	6,742
0,18	4,552	0,17	3,675	0,04	6,185	0,06	4,268
-0,03	0,316	-0,03	0,316	-0,03	0,316	-0,03	0,316

Магnezит має властивість нелінійно збільшувати власну терmostійкість при підвищенні температури до 1773 – 1923 К [83]. При підвищенні сили струму до 8 А, температура потоку плазми лінійно збільшується до 7557 К, таблиця 3.2. Це призводить до кристалізації структур магnezиту і збільшення питомої сили вдавлювання з 0,02 Н/мкм до 0,06 Н/мкм. Руйнуються кристалічні зв'язки і вноситься штучна дефектність додатково до існуючої природної. При підвищенні сили струму з 8 А до 10 А, питома сила вдавлювання індентора знижується лінійно до 0,05 Н/мкм. Структура магnezиту ослаблюється. Питома сила вдавлювання індентора більша для магnezиту на 2,5 %, ніж для кальциту через більший на 0,2 % коефіцієнт субрезонансу.

Таблиця 4.8 - Залежність сили вдавлювання індентора від глибини відбитку для магнезиту до та після руйнування при зміні індуктивності

До руйнування		Після руйнування – індуктивність, L, мкГн					
		11,92		23,84		35,76	
Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм	Сила вдавлювання індентора, Н	Глибина відбитку, мкм
0	0	0	0	0	0	0	0
0,08	6,377	0,06	2,037	0,07	2,043	0,05	2,345
0,23	8,348	0,17	3,468	0,26	5,024	0,14	3,342
0,32	10,743	0,24	5,243	0,31	6,424	0,27	5,161
0,40	12,534	0,36	7,615	0,44	9,146	0,36	8,344
0,47	15,387	0,56	9,344	0,55	10,053	0,52	10,057
0,53	21,855	0,71	11,027	0,61	12,148	0,61	12,847
0,59	27,845	0,82	13,784	0,77	15,644	0,75	15,534
0,63	31,847	0,98	15,477	0,89	17,156	0,86	19,648
0,81	46,734	1,32	21,845	1,20	25,034	1,07	25,134
0,62	31,543	0,96	15,127	0,87	16,344	0,84	18,345
0,54	22,452	0,82	10,387	0,72	14,274	0,70	14,534
0,46	14,544	0,63	7,678	0,61	11,837	0,51	11,945
0,34	11,374	0,47	6,153	0,40	9,644	0,33	8,135
0,27	8,457	0,32	5,838	0,34	8,344	0,18	6,031
0,18	4,552	0,17	3,758	0,15	3,835	0,09	4,535
-0,03	0,316	-0,03	0,316	-0,03	0,316	-0,03	0,316

Аналогічно при збільшенні індуктивності до 11,92 мкГн, температура потоку плазми лінійно збільшується до 7557 К, таблиця 3.2. Це призводить до кристалізації структур магнезиту і збільшення питомої сили вдавлювання з 0,02 Н/мкм до 0,06 Н/мкм. Аналогічно вноситься штучна дефектність додатково до існуючої природної, що знижує енергоємність руйнування, підрозділ 4.3. При підвищенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, питома сила вдавлювання індентора знижується лінійно до 0,04 Н/мкм. Структура магнезиту ослаблюється. При збільшенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, енергія потоку індуктивної плазми знизилась з 0,269 ПДж до 0,089 ПДж, таблиця 3,4. Частота власних кругових коливань плазми знизилась з $0,591 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ до $0,537 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, таблиця 3.2. Виникає одиничний субрезонанс через збіжність протифаз коливань потоку індуктивної плазми та кристалічних структур. Питома сила вдавлювання індентора у магнезит менша на 11 % при зміні індуктивності для магнезиту, ніж при збільшенні сили струму до 10 А. На рисунку 4.8 наведено поверхню магнезиту до та після руйнування плазмою.

Зафіксовано, що під впливом температурної складової потоку плазми виникає вихід на поверхню мікродомішок 1 на другому і третьому фрагментах. Це відбувається внаслідок руйнування слабких фракцій після кристалізації магнезиту, що пояснюється внесенням штучних дефектностей при виході зі структури домішкових фракцій.

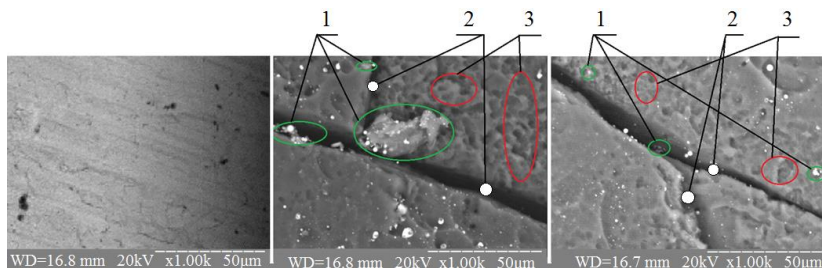


Рисунок 4.8 – Поверхня магнезиту до та після руйнування плазмою, збільшення $\times 1000$ крат, зліва праворуч: фрагменти 1й – до руйнування; 2й – сила струму 10 А, індуктивність 11,92 мкГн; 3й – сила струму 8 А, індуктивність 35,72 мкГн; де 1 – вихід на поверхню мікродомішок під впливом температурної складової, 2 – магістральні тріщини від впливу субрезонансної складової потоку індуктивної плазми, 3 – кратери, як результат впливу температурної складової; WD – відстань між об'єктивом мікроскопа та поверхнею зразка у камері для зразків в мм; 20.00 kV – прискорююча напруга РЭМ-106И; $\times 1.00$ k – збільшення, крат; 50 μm – показник шкали на знімку структури, мкм

На другому і третьому фрагментах виникли магістральні тріщини 2. Їх товщина не перевищує 10 мкм. Вони утворились внаслідок впливу субрезонансної складової потоку індуктивної плазми на кристалічні структури магнезиту. Зафіксоване виникнення кратерів 3 овальної форми діаметром до 10 мкм через дію температурної складової потоку плазми на поверхню. Відбулось випаровування з поверхні магнезиту при температурі, вищій 1923 К. При ослабленні кристалічних структур кварцу потоком індуктивної плазми спостерігається вплив двох типів – температурний і субрезонансний.

4.3. Параметри плазмо-механічного руйнування кристалічних структур

Експериментально визначено приведений модуль пружності I роду зразків в області індентування, до і після проведення серії дослідів відповідно до ISO 14577-1:2002 [115] та ГОСТ Р 8.748-2011 [117] E_r , ГПа:

$$E_r = (\sqrt{\pi}) / \left(2 \cdot (dl/dF) \cdot \sqrt{A_p} \right), \quad (4.1)$$

де dl – видовження зразку, м;

dF – сила, прикладена до зразку, Н;

A_p – площа поперечного перетину контактної поверхні між індентором та зразком, m^2 .

Площа індентора визначена непрямым методом [117]. Для калібрування індентора використано зразок гематиту, який не знаходився під впливом потоку індуктивної плазми.

За приведеним модулем пружності I роду визначено модуль пружності I роду зразка, відповідно до вимог ГОСТ Р 8.748-2011 [117], E , ГПа:

$$E = \left(1 - \nu_s^2 \right) / \left(\left(1/E_r \right) - \left(\left(1 - \nu_i^2 \right) / E_i \right) \right), \quad (4.2)$$

де ν_s - коефіцієнт Пуассона зразка, в. о.;

$\nu_i = 0,007$ - коефіцієнт Пуассона алмазного індентора, в. о. [117];

$E_i = 1,14 \cdot 10^3$ - модуль пружності I роду алмазного індентора, ГПа [117].

Експериментальні значення модулю пружності I роду для зразків кристалічних структур до і після проведення серії дослідів зведено у таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Визначення модулю пружності I роду непрямим методом

Модуль пружності I роду структури до руйнування, ГПа			Модуль пружності I роду структури після руйнування, ГПа							
			Зміна сили струму			Сила струму, А	Зміна індуктивності			Індуктив ність, мкГн
приведе ний	експери менталь ний	теоретич ний	приведе ний	експери менталь ний	теоре тичний		приве дени й	експери менталь ний	теоретич ний	
Гематит										
178,5	207,5	191,4	130,0	143,9	144,4	8	130,0	143,9	144,4	11,92
			118,9	130,2	134,5	9	105,1	113,5	115,1	23,84
			103,5	111,6	111,0	10	99,8	107,3	100,7	35,76
Кварц										
98,6	105,8	107,9	94,8	101,5	104,3	8	94,8	101,5	104,3	11,92
			89,3	95,0	97,2	9	80,4	84,8	83,1	23,84
			77,9	82,0	80,2	10	71,7	75,1	72,8	35,76
Кальцит										
66,4	69,2	71,5	151,6	171,4	168,9	8	151,6	171,4	168,9	11,92
			141,2	158,0	157,3	9	123,3	135,5	134,5	23,84
			116,3	127,0	129,8	10	107,2	116,0	117,8	35,76
Магnezит										
42,8	43,6	45,7	149,9	169,3	167,2	8	149,9	169,3	167,2	11,92
			137,6	153,4	155,7	9	118,9	130,2	133,2	23,84
			119,0	130,3	129,8	10	106,0	114,5	116,6	35,76

На рисунках 4.9 – 4.10 наведено характер зміни модулю пружності I роду при зміні сили струму та індуктивності, відповідно, та їх порівняння із теоретичними значеннями.

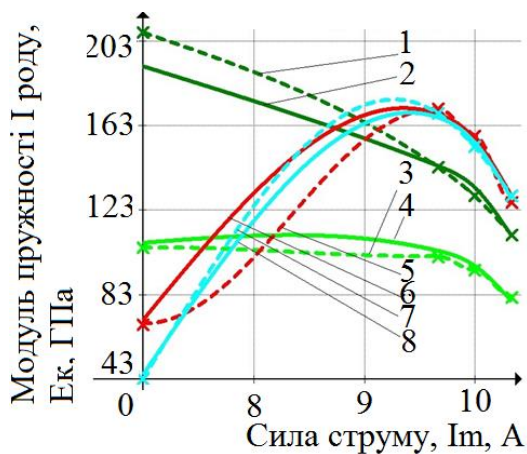


Рисунок 4.9 – Залежність модулю пружності I роду від сили струму, де 1, 2 – криві значень гематиту, 3, 4 – кварцу, 5, 6 – кальциту, 7, 8 – криві значень магнезиту теоретичних та експериментальних, відповідно

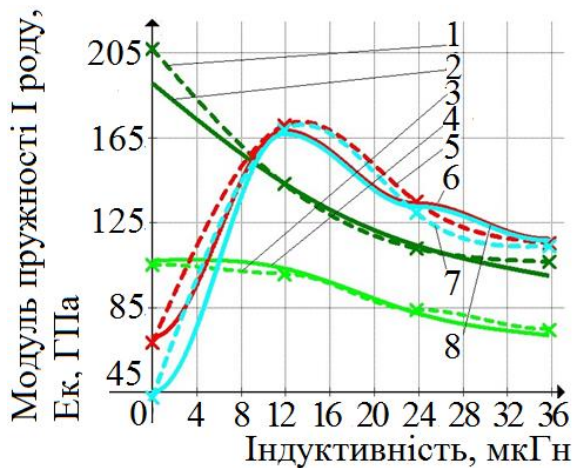


Рисунок 4.10 – Залежність модулю пружності I роду від зміни індуктивності, де 1, 2 – криві значень гематиту, 3, 4 – кварцу, 5, 6 – кальциту, 7, 8 – магнезиту теоретичних та експериментальних, відповідно

Встановлено, що зміна модулю пружності I роду при руйнуванні кристалічних структур потоком індуктивної плазми відбувається за асиметричним розподілом. Екстремуми – зафіксовані точки руйнування міцних фракцій. При цьому відбувається руйнування кристалічних структур і їх знеміцнення. Зафіксовано оберненопропорційну залежність між піковими точками функцій (екстремумами) та коефіцієнтом субрезонансу. Встановлено, що із наближенням коефіцієнту субрезонансу до нуля виникають чисельні асиметричні субрезонанси. При руйнуванні кристалічних структур потоком індуктивної плазми досягнуто зниження модулю пружності I роду:

– для гематиту:

а) удвічі з 207,5 ГПа до 111,6 ГПа при збільшенні сили струму до 10 А. Це пояснюється тим, що при збільшенні енергії потоку індуктивної плазми з 0,2692 ПДж до 1,075 ПДж, зростає передача надлишкової енергії атомам кристалічних структур гематиту. Руйнуються їх зв'язки із сусідніми атомами через субрезонансні коливання. Виникає штучна дефектність, що додається до існуючої природної;

б) удвічі з 207,5 ГПа до 107,3 ГПа при підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн. Внесена штучна дефектність знизила модуль пружності I роду на 2,0 % більше, ніж при збільшенні сили струму через нелінійність процесу. При збільшенні індуктивності до 35,76 мкГн, енергія потоку індуктивної плазми знизилась з 0,269 ПДж до 0,089 ПДж, таблиця 3,4. Частота власних кругових коливань плазми знизилась з $0,591 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$ до $0,537 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$, таблиця 3.2. При наближенні коефіцієнта субрезонанса до нуля, виникають асиметричні субрезонанси.

– для кварцу:

а) з 105,8 ГПа до 82,0 ГПа при збільшенні сили струму до 10 А, через субрезонансні коливання, що аналогічно структурам гематиту;

б) з 105,8 ГПа до 75,1 ГПа при підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн, через наближенні коефіцієнта субрезонанса до нуля, що аналогічно структурам гематиту. При цьому виникли асиметричні субрезонанси, які внесли штучну дефектність до існуючої природної.

Зафіксовано кристалізацію через індивідуальні властивості кристалічних структур і підвищення модулю пружності I роду

– **для кальциту:**

а) з 69,2 ГПа до 129,8 ГПа при збільшенні сили струму до 10 А. Кальцит належить до групи ауксетиків [84]. При збільшенні сили струму до 8 А, шарніроподібні кристалічні структури розширюються перпендикулярно прикладеному навантаженню [84]. При цьому змінюється міра ангармонізму міжатомних коливань слабких фракцій [85]. Експериментально доведено [86], що зростання параметру кристалічної решітки до 0,5 % відбувається через розширення кристалічних структур, при розтягненні їх зв'язків. При цьому збільшується амплітуда коливань кристалічних структур, а отже знижується частота. Коефіцієнт субрезонансу збільшується, а кристалічна структура зміцнюється до значення модулю пружності I роду 171,4 ГПа. При силі струму 8 А досягнуто пікової точки виникнення асиметричного субрезонансу і кристалічні структури ослаблюються до 129,8 ГПа;

б) з 69,2 ГПа до 116,0 ГПа при підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн. Аналогічно, як із збільшенням сили струму, підвищення індуктивності до 11,92 мкГн через зміну міри ангармонізму міжатомних коливань слабких фракцій, призводить до зміцнення кристалічних структур до 171,4 ГПа. При цьому досягається пікова точка виникнення асиметричного субрезонансу і кристалічні структури ослаблюються до 116,0 ГПа

– **для магнезиту:**

а) утричі з 43,6 ГПа до 130,3 ГПа при збільшенні сили струму до 10 А. Магнезит має властивість нелінійно збільшувати власну термостійкість при підвищенні температури до (1773 – 1923) К [83]. При підвищенні індуктивності до 8 А, температура потоку плазми збільшилась до 7557 К, таблиця 3.2. Це призвело до кристалізації структур магнезиту і збільшення його модулю пружності I роду до 169,3 ГПа. При підвищенні сили струму з 8 А до 10 А, модуль пружності I роду магнезиту оберненопропорційно знижується до 130,3 ГПа. Руйнуються кристалічні зв'язки і вноситься штучна дефектність додатково до існуючої природної;

б) при збільшенні індуктивності до 11,92 мкГн, змінюється міра ангармонізму міжатомних коливань слабких фракцій. Магнетит має властивість нелінійно збільшувати власну термостійкість при підвищенні температури до 1773 – 1923 К [83]. При підвищенні індуктивності до 11,92 мкГн, температура потоку плазми наближена до 7557 К, таблиця 3.2. Це призводить до кристалізації структур магнетиту і збільшення модулю пружності I роду до 169,3 ГПа. При підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн, модуль пружності I роду оберненопропорційно знижуються до 114,5 ГПа. Енергія потоку індуктивної плазми знизилась з 0,269 ПДж до 0,089 ПДж, таблиця 3,4. Частота власних кругових коливань плазми знизилась з $0,591 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ до $0,537 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, таблиця 3.2.

Похибка між експериментальними значеннями модулю пружності I роду та теоретично розрахованими до (3.20) та після (3.37) руйнування потоком індуктивної плазми сягає 7,7 %, що узгоджує експериментальні дані із моделюванням залежностей.

Експериментально визначені значення модулю пружності I роду до та після руйнування потоком індуктивної плазми дозволяють проаналізувати питому енергоємність плазмо-механічного руйнування за (3.44), A_v , Дж/м³:

$$A_v = \frac{P_c \cdot t \cdot m \cdot c}{Z \cdot \sum \varepsilon_i \cdot V_{\text{пор}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E_a}}} + \frac{P \cdot t}{V_{\text{пор}} \cdot \frac{E_0}{E_k}} \quad (4.3)$$

Порівняння експериментальних та теоретичних значень залежності питомої енергоємності руйнування кристалічних структур потоком індуктивної плазми від зміни індуктивності та сили струму наведено у таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Питома енергоємність плазмо-механічного руйнування

Структура	Питома енергоємність СБШ-250 руйнування, А, ГДж/м ³		Зміна параметру блоку плазмового руйнування
	теорет. знач.	експер. знач.	
1	2	3	3
Механічне			—
Гематит	0,575	0,598	
Кварц		0,569	
Кальцит		0,565	
Магnezит		0,561	
Плазмо-механічне			Зміна індуктивності, L, мкГн
Гематит	0,473	0,472	11,92
	0,422	0,419	23,84
	0,355	0,407	35,76
Кварц	0,565	0,557	11,92
	0,504	0,509	23,84
	0,472	0,479	35,76
Кальцит	0,715	0,720	11,92
	0,638	0,640	23,84
	0,597	0,592	35,76
Магnezит	0,809	0,814	11,92
	0,722	0,713	23,84
	0,675	0,669	35,76
Плазмо-механічне			Зміна сили струму, I, А
Гематит	0,473	0,472	8
	0,456	0,449	9
	0,414	0,415	10
Кварц	0,565	0,557	8
	0,545	0,539	9
	0,496	0,501	10
Кальцит	0,715	0,720	8
	0,690	0,671	9
	0,627	0,620	10
Магnezит	0,809	0,814	8
	0,780	0,774	9
	0,709	0,714	10

Примітка: «теорет. знач.», «експер. знач.» - теоретичні та експериментальні значення, відповідно.

Встановлено експериментальні значення питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування та порівняно із їх теоретичними значеннями, таблиця 4.10. Встановлено, що похибка між експериментальними та теоретичними значеннями не перевищує 3,8 %. На рисунках 4.11 та 4.12 наведено зміну питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування СБШ-250 при варуванні індуктивності та сили струму, відповідно, для аналізу характеру зміни кривих.

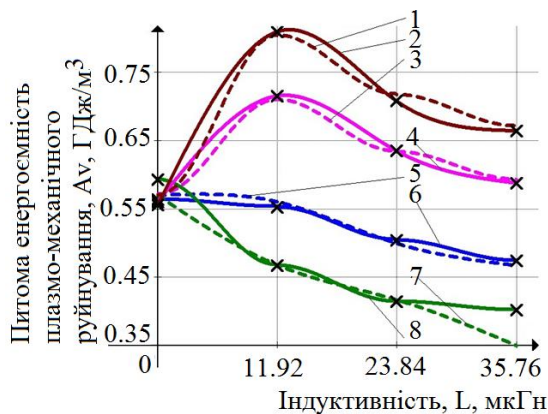


Рисунок 4.11 – Залежність питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування СБШ-250 від зміни індуктивності, де 1, 2 – криві значень кальциту, 3, 4 – магнезиту, 5, 6 – гематиту, 7, 8 – кварцу теоретичних та експериментальних, відповідно

Зниження питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування для гематиту та кварцу має спадний характер, рисунок 4.11. При підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн, потужність електричної системи незмінна і становить 2,490 кВт. Енергія потоку індуктивної плазми знизилась з 0,269 ПДж до 0,089 ПДж, таблиця 3,4. Кругова частота власних кругових коливань плазми знизилась з $0,591 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ до $0,537 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, таблиця 3.2. При наближенні коефіцієнта субрезонансу до нуля, виникають асиметричні субрезонанси. Тому питома енергоємність руйнування гематиту та кварцу пропорційно знизилась до 20 % з 0,598 ГДж/м³ до 0,407 ГДж/м³, та з 0,569 ГДж/м³ до 0,479 ГДж/м³, відповідно.

Питома енергоємність руйнування кальциту та магнезиту при підвищенні індуктивності до 11,92 мкГн, збільшилась з 0,565 ГДж/м³ до 0,720 ГДж/м³ та з 0,561 ГДж/м³ до 0,814 ГДж/м³, відповідно, рисунок 4.12. Це пояснюється властивостями кальциту та магнезиту. Магnezит має властивість нелінійно збільшувати власну термостійкість при підвищенні температури до (1773 – 1923) К [83]. При підвищенні індуктивності до 11,92 мкГн, температура потоку плазми коливається в межах 7557...9141 К, таблиця 3.2. Це призводить до

кристалізації структур магнезиту і збільшення на 40 % значень питомої енергоемності їх руйнування. Кальцит відноситься до групи ауксетиків. При його навантаженні, шарніроподібні структури розтягуються і руйнуються зв'язки слабких фракцій. Через зниження їх кількості – зросла питома енергоемність руйнування кальциту. При збільшенні індуктивності до 35,76 мкГн, коефіцієнт субрезонансу знижується, таблиця 3.10, і виникають асиметричні субрезонанси, які розривають зв'язки кристалічних структур. Питома енергоемність плазмо-механічного руйнування кальцитів та магнезитів знизилась на третину з $0,720 \text{ ГДж/м}^3$ до $0,592 \text{ ГДж/м}^3$ та з $0,814 \text{ ГДж/м}^3$ до $0,669 \text{ ГДж/м}^3$, відповідно.

При підвищенні сили струму до 10 А, відбувається зниження питомої енергоемності плазмо-механічного руйнування для гематиту та кварцу, рисунок 4.12. Лінійно підвищується потужність електричної системи з 2,490 кВт до 2,930 кВт. Це викликає ослаблення структур. Питома енергоемність плазмо-механічного руйнування при цьому знижується з $0,598 \text{ ГДж/м}^3$ до $0,415 \text{ ГДж/м}^3$, та з $0,569 \text{ ГДж/м}^3$ до $0,501 \text{ ГДж/м}^3$, відповідно. Це відбувається через виникнення субрезонансних коливань між власними круговими коливаннями кристалічних структур та потоком індуктивної плазми.

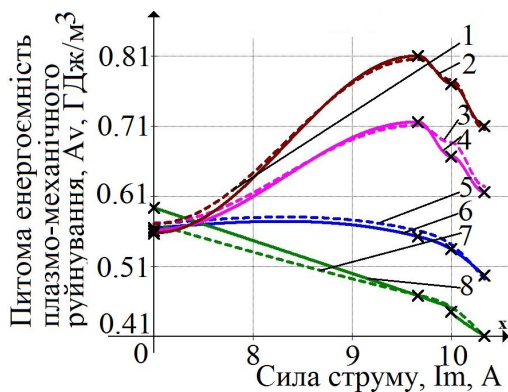


Рисунок 4.12 – Залежність питомої енергоемності плазмо-механічного руйнування СБШ-250 від зміни сили струму, де 1, 2 – криві значень кальциту, 3, 4 – магнезиту, 5, 6 – гематиту, 7, 8 – кварцу теоретичних та експериментальних, відповідно

Питома енергоємність руйнування кальциту та магнезиту при підвищенні сили струму до 8 А, збільшилась з 0,565 ГДж/м³ до 0,720 ГДж/м³ та з 0,561 ГДж/м³ до 0,814 ГДж/м³, відповідно, рисунок 4.12. Це пояснюються властивостями кальциту та магнезиту. Магnezит має властивість нелінійно збільшувати власну терmostійкість при підвищенні температури до (1773 – 1923) К [83]. При підвищенні сили струму до 8 А, температура потоку плазми коливається в межах 7557...9141 К, таблиця 3.2. Це призводить до кристалізації структур магнезиту і збільшення на 40 % значень питомої енергоємності їх руйнування. Кальцит відноситься до групи ауксетиків. При його навантаженні, шарніроподібні структури розтягуються і руйнуються зв'язки слабких фракцій. Через зниження їх кількості – зросла питома енергоємність руйнування кальциту. При збільшенні сили струму до 10 А, коефіцієнт субрезонансу знизився, таблиця 3.10, і виникають асиметричні субрезонанси, які розривають зв'язки кристалічних структур. Питома енергоємність плазмо-механічного руйнування кальцитів та магнезитів знизилась до 20 % з 0,720 ГДж/м³ до 0,620 ГДж/м³ та з 0,814 ГДж/м³ до 0,714 ГДж/м³, відповідно.

За (3.45) визначено експериментальні значення добової продуктивності плазмо-механічного руйнування та порівняно із теоретичними, таблиця 4.11.

Таблиця 4.11 – Залежність добової продуктивності плазмо-механічного руйнування від зміни сили струму та індуктивності

Структура	Добова продуктивність СБШ-250, Q _{т.доб} , м/добу		Зміна параметру блоку плазмового руйнування
Плазмо-механічна			Зміна індуктивності, L, мкГн
	теоретична	експериментальна	
1	2	3	4
Гематит	15,20	14,32	0
	18,53	18,57	11,92
	21,45	21,64	23,84
	23,25	22,39	35,76
Кварц	2,63	2,68	0
	2,72	2,79	11,92
	3,39	3,32	23,84
	3,85	3,74	35,76

Закінчення таблиці 4.11

1	2	3	4
Кальцит	43,40	44,26	0
	23,76	23,76	11,92
	28,28	28,28	23,84
	31,15	31,15	35,76
Магнезит	15,55	20,36	0
	5,94	5,86	11,92
	7,37	7,53	23,84
	8,36	8,50	35,76
Плазмо-механічна			Зміна сили струму, I, А
	теоретична	експериментальна	
Гематит	15,20	14,32	0
	18,53	18,57	8
	19,42	19,84	9
	21,93	21,86	10
Кварц	2,63	2,68	0
	2,72	2,79	8
	2,91	2,98	9
	3,51	3,43	10
Кальцит	43,40	44,26	0
	23,76	23,48	8
	25,11	25,02	9
	29,03	29,50	10
Магнезит	19,55	20,36	0
	5,94	5,86	8
	6,35	6,45	9
	7,55	7,53	10

При підвищенні сили струму до 10 А, добова продуктивність СБШ-250 при руйнуванні гематитів зростає на 52 % з 14,32 м/добу до 21,86 м/добу. Це пов'язано із зниженням модулю пружності І роду через знеміцнення гірської породи плазмовою складовою. При підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн, добова продуктивність СБШ-250 при руйнуванні гематитів зростає на 56 % з 14,32 м/добу до 22,39 м/добу. При руйнуванні кварцу, добова продуктивність СБШ-250 зростає аналогічно з 2,68 м/добу до 3,43 м/добу при підвищенні сили струму до 10 А, та з 2,68 м/добу до 3,74 м/добу при підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн.

При підвищенні сили струму до 10 А та індуктивності до 35,76 мкГн, добова продуктивність руйнування кальцитів та магнезитів знижується більше ніж на 30 %,

таблиця 4.11. Це пов'язано з тим, що структури кальциту та магнезиту зменшують кількість дефектів за рахунок руйнування слабких фракцій, і домінування міцних фракцій. У кальциті це відбувається за рахунок шарніроподібних структур, що мають властивості розтягуватись та збільшувати параметр кристалічної решітки до 10 %. Магнезит при збільшенні температури від плазмового навантаження – кристалізується. Тому, добова продуктивність плазмо-механічного руйнування кальцитів та магнезитів знижується.

Похибка між експериментальними та теоретичними значеннями не перевищує 8 %. Тому, результати математичного моделювання є адекватними реальним значенням.

Визначено, що при руйнуванні структур з модулем пружності I роду від 100 ГПа, раціональним є використання плазмо-механічного руйнування із підвищенням сили струму до 10 А, або підвищенням індуктивності до 35,76 мкГн. При руйнуванні структур з модулем пружності I роду нижче 100 ГПа не рекомендовано використовувати плазмо-механічного руйнування через зміцнення порід плазмовим навантаженням.

РОЗДІЛ 5

ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАЗМО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

5.1 Умови та планування промислової апробації

Промислова апробація результатів досліджень технології плазмо-механічного руйнування гірських порід виконана на Пинязевицькому кар'єрі, що розміщений коло селища міського типу Гранітне Житомирської області в період з 14.07.2015 року до 28.09.2015 року.

Плазмо-механічне руйнування гірських порід реалізоване коронкою модифікованою, рисунок 5.1. Вона використана для бурильного станка типу Сорсо Roc L8 на кар'єрі, яка з 2004 року прийнята на баланс кар'єру.

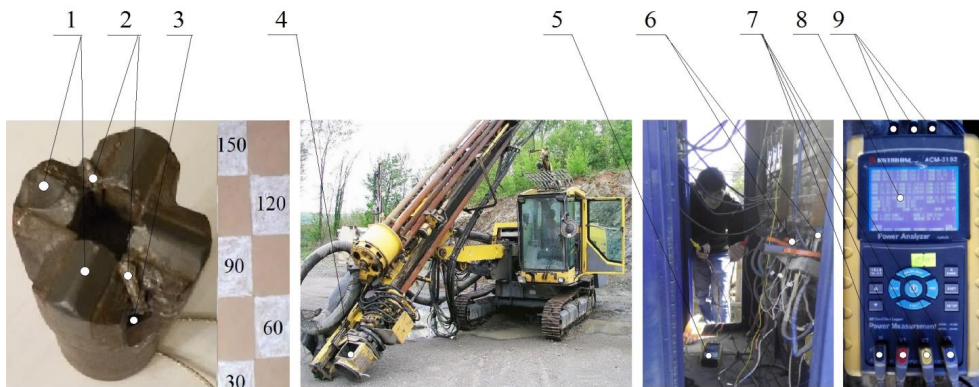


Рисунок 5.1 – Удосконалення технології плазмо-механічного руйнування гірських порід: 1 – вставки твердосплавні, 2 – дроти у високовольтній оплітці, 3 – продувний канал, 4 – коронка бурова модифікована, 5 – реєстратор потужності АКТАКОМ АСМ 3192, 6 – кабелі живлення 0,4 кВ, 7 – клєми вимірювачів напруги, 8 – дисплей виводу даних, 9 – клєми струмовимірюючих кліщів

При промисловій апробації плазмо-механічного руйнування забезпечено умови виникнення асиметричних субрезонансів між коливаннями потоків індуктивної плазми та кристалічних структур гранітів. Це реалізовано системою ключів, рисунок 4.2, для зміни сили струму до 10 А та індуктивності до 35,76 мкГн. При цьому змінюється міра ангармонізму міжатомних коливань слабких фракцій [85] і вони руйнуються. Це призводить до зниження модулю пружності I роду, який пропорційно залежить від міцності гірської породи [67]. Таким чином, плазмова складова знеміцнює гірську породу перед механічним руйнуванням.

Гірські породи кар'єру представлені рапаківіподібними гранітами із переважаючою ортоклазною складовою. Склад гранітів визначено методом електронної мікроскопії, таблиця 5.1. Для цього використано растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И, точність якого до 10 нм забезпечується взаємодією потоку електронів з поверхнею зразка, додаток А. Підготовка шліфів зразків граніту проведена за рекомендаціями [107] із використанням установки шліфування PetroThin, Buehler [108], що обладнана системою контролю зрізу із точністю до 0,01 мкм [108], додаток А.

За критерієм Стюдента із довірчою ймовірністю 0,9 в. о. відповідно до [32], абсолютна похибка, $\Delta \bar{E}$, ГПа [32]:

$$\Delta \bar{E} = t_{0,9,n} \cdot \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}}, \quad (5.1)$$

де E_i - модуль пружності I роду досліджуваного зразка граніту, ГПа;

\bar{E} , - середнє значення модулю пружності I роду, ГПа;

$t_{0,9,n}=2.92$ - критерій Стюдента, в. о. [32];

$f=n-1$ – кількість ступенів вільності, в. о. [32].

Таблиця 5.1 – Склад пинязевицького граніту

Гірська порода	Граніт	Мінерал	Зразок I	Зразок II	Зразок III			
Склад	Ортоклаз $K[AlSi_3O_8]$	Польовий шпат, %	62,88	61,26	61,35	Середнє	Абсолютна похибка	Модуль пружності I роду кадастрове значення [77], ГПа
	Плагіоклаз $Ca[Al_2Si_2O_8]$							
	Кварц SiO_2	Кварц, %	31,30	35,05	35,84			
	Біотит $K(Fe)_3(OH)_a[AlSi_3O_{10}]$	Біотит, %	5,82	3,69	2,81			
Модуль пружності I роду до руйнування, ГПа			48,6	49,0	48,8	48,8	0,3 ($\pm 0,6$ %)	46,0

Абсолютна похибка складає плюс-мінус 0,3 ГПа. Зміна модулю пружності I роду буде адекватною реальним процесам, якщо значення будуть більшими за визначену похибку. Похибка між кадастровим [77] та вимірним значенням модулю пружності I роду досягає 2,8 ГПа.

Для проведення апробації у промислових умовах складено програму досліджень у відповідності до [32]. Для дослідження зміни питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування гірських порід обрано ортогональне центральне композиційне планування, що має мінімальну і достатню кількість рівнів варіювання чинників – 3. Ядром плану є повночинниковий експеримент типу $2^2 - 2$ чинники (сила струму та індуктивність), 6 дослідів. Для апробації руйнування гранітів плазмо-механічним способом запропоновано рівні та інтервали варіювання основних чинників, відповідно до [32], таблиця 5.2.

Таблиця 5.2 – Рівні та інтервали варіювання чинників

Чинник	Рівні			Інтервал варіювання
	Нижній (-1)	Нульовий (0)	Верхній (+1)	
x_1 – сила струму, А	8	9	10	1
x_2 – індуктивність, мкГн	11,92	23,84	35,76	11,92
x_1 – сила струму, А	8	9	10	1
x_2 – індуктивність, мкГн	11,92	23,84	35,76	11,92

Рандомізацію дослідів проведено за допомогою генератора випадкових чисел. Матриця планування промислової апробації в явному вигляді зведена до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Матриця планування експерименту в явному вигляді

Порядок проведення дослідів	№ дослідів	x_0	Планування		
			Кристалічна структура	x_1	x_2
				Сила струму, А	Індуктивність, мкГн
1	4	+1	Граніт	0	0
2	1	+1		8	11,92
3	2	+1		9	11,92
4	5	+1		10	11,92
5	3	+1		8	23,84
6	6	+1		8	35,76

У відповідності до матриці планування, досліджено залежність питомої енергоємності руйнування A (кВт·год/т) після руйнування потоком індуктивної плазми в залежності від сили струму I (А) та індуктивності L (мкГн) для граніту: $A=f(I, L)$.

5.2 Плазмо-механічне руйнування рапаківіподібних гранітів

Для встановлення модулю пружності І роду, за методикою [70] визначено власну енергію зв'язків граніту, таблиця 5.4.

Таблиця 5.4 – Власна енергія зв'язків граніту

Домішки граніту	Ортоклаз	Плагіоклаз	Кварц	Біотит	Джерело
Хімічна формула	K[AlSi3O8]	Ca[Al2Si2O8]	SiO2	K(Fe)3(OH)a[AlSi3O10]	
Власна енергія зв'язків, Дж	0,95	9,79	0,59	0,17	[70]
Власна енергія зв'язків граніту, Дж	11,5				

Експериментальні значення модулю пружності І роду для граніту до і після плазмо-механічного руйнування зведено у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Визначення модулю пружності І роду непрямим методом

Модуль пружності І роду структури до руйнування		Модуль пружності І роду граніту після плазмового руйнування			
Експериментальне значення	Кадастрове значення [77]	Модуль пружності І роду, ГПа	Сила струму, А	Модуль пружності І роду, ГПа	Індуктивність, мкГн
Граніт					
48,8	46,0	52,0	8	52,0	11,92
		44,8	9	46,0	23,84
		38,0	10	41,0	35,76

Різниця між експериментальним 48,8 ГПа та кадастровим 46,0 ГПа [77] значеннями модулю пружності І роду пояснюється анізотропією та неоднорідністю гірських порід.

В результаті промислової апробації плазмо-механічного руйнування ГП, забезпечено виникнення субрезонансних явищ між коливаннями потоків індуктивної плазми та кристалічними структурами. При проведенні промислової апробації плазмо-механічного руйнування ГП підтверджено зниження модулю пружності І роду для гранітів з:

- 48,8 ГПа до 41,0 ГПа пропорційно підвищенню індуктивності до 35,76 мкГн;
- 48,8 ГПа до 38,0 ГПа пропорційно підвищенню сили струму до 10 А. (вимірювання за «ДСТУ 2825-94 Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять»).

На рисунку 5.2 наведено порівняння розрахункових (3.44) та експериментальних значень зниження питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування ГП.

Знеміцнення ГП плазмовим потоком знизило питому енергоємність руйнування гранітів на 10,8 % з $0,220 \text{ ГДж/м}^3$ до $0,196 \text{ ГДж/м}^3$ (з $61,38 \text{ кВт-год/м}^3$ до $54,69 \text{ кВт-год/м}^3$). Зниження питомої енергоємності руйнування гранітів досягнуто підвищенням індуктивності до $35,76 \text{ мкГн}$ і незмінній потужності електричної системи плазмового ослаблення $2,490 \text{ кВт}$ (розділ 3).

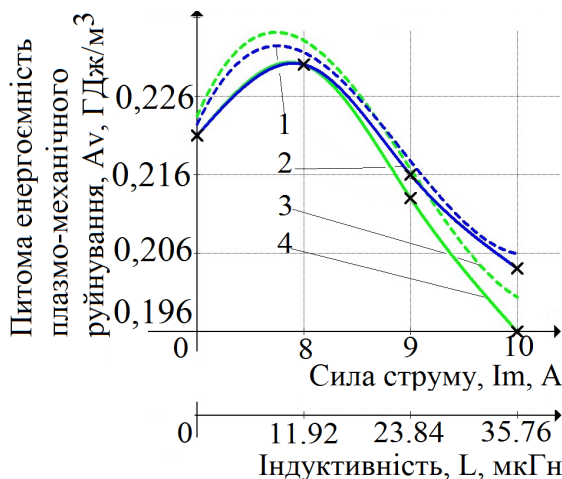


Рисунок 5.2 – Зниження питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування при зміні індуктивності (1, 2 – теоретична та експериментальна криві, відповідно) та сили струму (3, 4 – теоретична та експериментальна криві, відповідно)

Потужність виміряно аналізатором потужності АКТАКОМ АСМ-3192, додаток А. Він призначений для вимірювання активної, реактивної та повної потужностей із точністю до $0,001 \text{ кВт}$. Енергія потоку індуктивної плазми знизилась з $0,269 \text{ ПДж}$ до $0,089 \text{ ПДж}$, таблиця 3,4, розділ 3. Кругова частота власних кругових коливань плазми знизилась з $0,591 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ до $0,537 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, таблиця 3.2. Реактивний опір стримує енергетичний імпульс, що накопичується і розряджається у ГП. При збільшенні сили струму до 10 А , питома енергоємність руйнування граніту аналогічно знижується пропорційно до збільшення сили струму на $7,0 \%$ з $0,220$

ГДж/м³ до 0,204 ГДж/м³ (з 61,38 кВт·год/м³ до 56,60 кВт·год/м³). Питома енергоемність руйнування ГП при зміні сили струму на 1,91 кВт·год/м³ більша ніж при зміні індуктивності, через збільшення активної складової енергії з 2,490 кВт до 2,930 кВт, розділ 4.

За (3.45) визначено експериментальні значення добової продуктивності плазмо-механічного руйнування та порівняно із теоретичними, таблиця 5.6.

Таблиця 5.6 – Залежність добової продуктивності плазмо-механічного руйнування від зміни сили струму та індуктивності

Структура	Добова продуктивність Corco Roc L8 при плазмо-механічному руйнуванні, Q _{т.доб} , м/добу		Зміна параметру блоку плазмового руйнування
	теоретична	експериментальна	Зміна індуктивності, L, мкГн
1	2	3	4
Граніт	40,83	38,60	0
	38,45	36,33	11,92
	42,58	40,83	23,84
	44,50	45,52	35,76
	теоретична	експериментальна	Зміна сили струму, I, А
	40,83	38,60	0
	37,72	36,33	8
	40,83	41,86	9
	46,59	48,90	10

При підвищенні сили струму до 10 А, добова продуктивність Corco Roc L8 при руйнуванні гранітів зростає на 26 % з 38,60 м/добу до 48,90 м/добу. Це пов'язано із зниженням модулю пружності I роду через знеміцнення гірської породи плазмовою складовою. При підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн, добова продуктивність СБШ-250 при руйнуванні гематитів зростає на 17 % з 38,60 м/добу до 45,52 м/добу. При розрахунку річної продуктивності плазмо-механічного руйнування на Corco Roc L8, вона зростає:

- з 7 720 м/рік до 9 770 м/рік при підвищенні сили струму до 10 А;
- з 7 720 м/рік до 9 100 м/рік при підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн.

До таблиці 5.7 зведено результати промислової апробації плазмо-механічного руйнування на базі бурового станка Atlas Corco L8.

Таблиця 5.7 - Результати промислової апробації плазмо-механічного руйнування на базі бурового станка Atlas Copco L8

Параметр	Механічне руйнування	Плазмо-механічне руйнування	
		Індуктивність 35,76 мкГн	Сила струму 10 А
Потужність бурового станка, кВт	317	319	320
Швидкість буріння свердловини, м/год	6,8	8,0	8,6
Радіус свердловини, мм	152	152	152
Питома енергоємність бурового станка, кВт·год/куб.м	61,38	54,69	56,60
Питома енергоємність бурового станка, ГДж/куб.м	0,220	0,196	0,204
Добова продуктивність бурового станка, м/добу	38,60	45,52	48,90
ККД бурового станка, %	81	83	82

При дотриманні вимог [119 – 122], удосконалена технологія плазмо-механічного руйнування ГП може використовуватись в умовах підземної розробки, наприклад на базі установки [123]. При цьому, виконуватимуться вимоги [124]. Вимірювання міцності рекомендовано проводити відповідно до [115, 117, 125]. Використання удосконаленої технології плазмо-механічного руйнування ГП знижує вплив на екологію, як наслідок зниження питомої енергоємності буріння вибухових свердловин, що відповідає вимогам [126, 127].

5.3. Економічна ефективність плазмо-механічного руйнування

Економічну ефективність промислової апробації плазмо-механічного руйнування гірських порід на Пинязевицькому кар'єрі виконано відповідно до «Методика визначення економічної ефективності використання в народному господарстві нової техніки, винаходів і раціоналізаторських пропозицій» [128].

Базовим варіантом визначено руйнування гірських порід на Пинязевицькому кар'єрі механічним способом. Він реалізувався бурінням свердловин установкою Atlas Copco L8. За новий варіант визначено руйнування модернізованою установкою

Atlas Corco L8 із передуючим механічному руйнуванню плазмовим ослабленням гірських порід.

Розрахунок річного економічного ефекту від використання технології плазмово-механічного руйнування ГП визначено у відповідності до [128], грн./рік:

$$З = (З_1 - З_2) \cdot V = (114,93 - 103,66) \cdot 140000 = 1577800,00, \quad (5.2)$$

де $З$ – річний економічний ефект, грн.;

$З_1$ і $З_2$ – приведені витрати одиниці продукції відповідно базового та нового варіанту, грн. /м³:

$$З_1 = C_1 + (E_n \cdot K_1) = 114,90 + (0,199 \cdot 0,169) = 114,93, \quad (5.3)$$

$$З_2 = C_2 + (E_n \cdot K_2) = 102,38 + (0,199 \cdot 6,446) = 103,66, \quad (5.4)$$

де $C_1 = 114,90$, $C_2 = 102,38$ – собівартість руйнування гірських порід відповідно базового (механічним способом на Пинязевицькому кар'єрі) та нового (плазмово-механічне руйнування) варіанту, відповідно, грн./ м³;

$E_n = 0,199$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, в. о. [130].

Собівартість руйнування C_n , грн.:

$$C_1 = A_1 \cdot TE = 61,38 \cdot 1,872 = 114,90, \quad (5.5)$$

$$C_2 = A_2 \cdot TE = 54,69 \cdot 1,872 = 102,38, \quad (5.6)$$

де $A_1=61,38$, $A_2=54,69$ - витрата електроенергії на руйнування м³ породи за базовим та новим варіантом, відповідно, кВт·год, визначено експериментально;

ТЕ = 1,872 – тариф електроенергії за першим класом напруги від ПАТ «Житомиробленерго» з ПДВ, грн./кВт·год, [129].

Питомі капітальні вкладення у виробничі фонди відповідно базового та нового варіанту, K_1 , K_2 , грн./м³, відповідно:

$$K_1 = B_1/V = 23693,25 / 140000 = 0,169, \quad (5.7)$$

$$K_2 = \left[\frac{B_{\text{ндр}2} + B_{\text{впр}2} + B_{\text{мат}2}}{V} \right] = \left[\frac{87417,14 + 157732,85 + 657220}{140000} \right] = 0,556, \quad (5.8)$$

де $B_1=23693,25$ – витрати за базовим варіантом, грн. [131];

$V = 140000$ – середній річний об'єм видобутку породи, м³ (відомості з бухгалтерії);

$B_{\text{ндр}2}=87417,00$ – вартість науково-дослідної роботи на розробку Системи руйнування індуктивною плазмою, грн. Науково-дослідна робота проведена відповідно до ДСТУ 3974 – 2000 «Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання дослідно – конструкторських робіт. Загальні положення» [132] у термін з 01.07.2014 р. до 01.10.2014 р. Вартість визначено за «Правилами визначення вартості проектно-дослідницьких робіт. ДБН Д.1.1-7-2000» [133]:

$$B_{\text{ндр}2} = \left(\frac{V}{27,9} + 0,2109 \cdot V \right) \cdot 0,205 \cdot 7,77 \cdot 1,01 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 87417,14; \quad (5.9)$$

де $B_{\text{впр}2}=0,24 \cdot B_{\text{мат}2}$ – вартість монтажу системи плазмо-механічного руйнування, грн. [134];

$B_{\text{мат}2}=657220,22$ - витрати на обладнання за новим варіантом зведено до таблиці 5.7, грн.(подвійна сума з урахуванням необхідності дослідів на експериментальному стенді);

Таблиця 5.7 – Вартість обладнання плазмо-механічного руйнування

Номер, найменування і кількість обладнання	Вартість, з ПДВ, грн	Джерело
1. Коронки бурові Atlas Copco 90003613, 3 шт.	23693,25	[131]
2. Модернізація бурового станка Atlas Copco L8	300000,00	[135]
3 Автотрансформатор RUCELF ЛАТР LTC-500, 1 шт.	2088,00	[136]
4. Підвищувальний трансформатор НОМ – 10 – 66, 1 шт.	1600,00	[137]
5. Дріт мідний для виготовлення котушок індуктивності ПЭТ – 155, 0,45, 3 км	1176,60	[138]
6. Дріт з'єднувальний ВПП 4,0, 6 м	52,26	[139]
Всього	657220,22	

Термін окупності плазмо-механічного руйнування, Т, роки:

$$T = \left[\frac{V_{\text{ндр}2} + V_{\text{впр}2} + V_{\text{мат}2}}{3} \right] = \left[\frac{87417,144 + 157732,85 + 657220,22}{1577800,00} \right] = 0,572. \quad (5.10)$$

Таким чином, розрахунковий річний економічний ефект від промислової апробації складає 1 577 800,00 грн., очікуваний термін окупності промислової апробації плазмо-механічного руйнування – 0,572 роки ((12/100)·57,2=7 місяців).

ЗАКЛЮЧЕННЯ

Найбільш важливі наукові та практичні результати, представлені у монографії:

1. Встановлено зміну модулю пружності I роду за квадратичною залежністю від енергії молекулярних зв'язків кристалічних структур, що дозволило оцінити енергетичний потенціал гірських порід.

2. Визначено залежності питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування гірських порід від індуктивності за унімодальним розподілом із позитивною асиметрією та від сили струму за унімодальним розподілом із негативною асиметрією, що дозволило обрати раціональний режим комбінованого навантаження гірських порід при відкритій розробці родовищ корисних копалин.

3. Розроблено математичну модель питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування гірських порід, яка відрізняється від відомих тим, що враховує потужність плазмового індуктивного навантаження.

4. Підвищено продуктивність плазмо-механічного буріння вибухових свердловин до 26 % пропорційно збільшенню сили струму та індуктивності блоку плазмового руйнування за рахунок сумісного у часі комбінованого навантаження на гірську породу.

5. Знижено питому енергоємність плазмо-механічного руйнування гранітів:

– на 10,8 % з $0,220 \text{ ГДж/м}^3$ до $0,196 \text{ ГДж/м}^3$ (з $61,38 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^3$ до $54,69 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^3$) пропорційно підвищенню індуктивності до $35,76 \text{ мкГн}$;

– на 7,0 % з $0,220 \text{ ГДж/м}^3$ до $0,204 \text{ ГДж/м}^3$ (з $61,38 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^3$ до $56,60 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^3$) пропорційно підвищенню сили струму до 10 А.

6. Використано сукупність енергії зовнішніх навантажень із внутрішньою енергією середовища, що сприяло підвищенню ККД руйнування гірських порід модифікованим ріжучим інструментом Atlas Copco L8 з 81 % до 83 % за рахунок попереднього ослаблення гірських порід плазовими навантаженнями.

7. Розроблено методику розрахунку та вибору параметрів плазмо-механічного руйнування гірських порід, що дозволила визначити питому

енергоємність комбінованого буріння вибухових свердловин із врахуванням потужності плазмового індуктивного навантаження.

8. Річний економічний ефект від впровадження плазмо–механічного руйнування гірських порід в умовах Пинязевицького кар'єру досягає 1 577 800 грн. Розрахунковий термін окупності впровадження удосконаленої технології плазмо–механічного руйнування гірських порід складає 7 місяців.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бартенев Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г. М. Бартенев. – Москва: Химия, 1984. – 280 с.
2. Пестриков В. М. Механика разрушения твердых тел / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – Санкт–Петербург: Профессия, 2002. – 320 с. – (КНУ им. Т. Г. Шевченко).
3. Erdogan F. Fracture mechanics / Erdogan // International Journal of Solids and Structures. – 2000. – №37. – P. 171–183.
4. Механика в СССР [Электронный ресурс] /Советские достижения в мировой науке. – Режим доступа: <http://mechanicka.ru/398/> – 16.05.2013 г. –Загл. с экрана.
5. Черепанов Г. П. Механика разрушения композитных материалов [Текст] / Г. П. Черепанов. – М. :Наука, 1983. – 296 с.
6. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение [Текст] / Г. И. Бабат. – М. : Энергия, 1965. – 551 с.
7. Болдырев Г. Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты. [Текст] : учеб. / Г. Г. Болдырев, М. В. Малышев; КНУ им. Т. Г. Шевченко. – Пенза : ПГУАС, 2009. – 412 с. – ISBN 987–5–9282–0575–1.
8. Blumenauer Horst. Werkstoffprüfung [Text] / Horst Blumenauer. – Leipzig. : John Wiley & Sons Australia, 2003. – 426 p., ISBN 352730908X, 9783527309085.
9. Yokobori T. An Interdisciplinary Approach to Fracture and Strength of Solids [Text] / T. Yokobori. – Groningen. : Wolters Noordhoff scientific publications Ltd., 1971. – 264 p.
10. Kausch H. H. Polymere Fracture [Text] / H. H. Kausch. – Berlin, Heidelberg, New York. : Springer–Verlag, 1978. – 441 p.
11. Регель В. Р. Кинетическая теория твердых тел [Текст] : учеб. Пособ. / В. Р. Регель, А. И. Слутсер, Е. Е. Томашевский ; под общ. ред. Д. А. Миртовой; издательство «Наука». – М. : Наука, 1974. – 560 с.

12. Narisava I. Polymere Strength [Text] / I. Narisava. – Japan. : OHMSHA, 1982. – 399 p.
13. Волькенштейн Ф. Ф. Зонная теория твердого тела и пределы ее применимости [Текст] / Ф. Ф. Волькенштейн // Журн. Успехи физических наук. – 1951. – Т. 43, № 1. – С. 11–29.
14. Зейтц Ф. Современная теория твердого тела [Текст] / Ф. Зейтц. – М., Ленинград : Государственное издательство технико–теоретической литературы, 1949. – 736 с.
15. Ястребов Л. И. Основы одноэлектронной теории твердого тела [Текст] : учеб. / Л. И. Ястребов, А. А. Кацнельсон ; Главная редакция физико–математической литературы. – М. : Наука, 1981. – 320 с.
16. Зи Э. Квантовая теория поля в двух словах [Текст] / Э. Зи. – М. : R&C Dynamics, 2009. – 615 с.
17. Ипатова И. П. Квантовая теория твердых тел [Текст] / И. П. Ипатова. – СПб. : Издательство Политехнического университета, 2008. – 234 с.
18. Глимм Дж. Математические методы квантовой физики [Текст] : учеб. / Дж. Глимм, А. Джаффе ; Главная редакция физико–математической литературы. – М. : Меркурий – Пресс, 2000. – 444 с.
19. Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов [Текст] : учебн. пособие / В. И. Курец, М. А. Соловьев, А. И. Жучков, А. В. Барская . – Томск. : Изд–во ТПУ, 2012. – 272 с.
20. Самарский А. А. Задачи и упражнения по численным методам [Текст] : учеб. пособие / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич, Е. А. Самарская ; – М. : Эдиториал УРСС, 2000. – 208 с. – ISBN 5–8360–0158–8
21. Решение системы линейных уравнений методом Гаусса–Жордана [Электронный ресурс] / Задачи оптимизации. – Режим доступа : [www/ URL: http://www.uchimatchast.ru/aplication/haus.php](http://www.uchimatchast.ru/aplication/haus.php) – 10.10.2013 г. – Загл. с экрана.

22. Метод Гаусса [Электронный ресурс] / Теория вероятности и математическая статистика. – Режим доступа : [www/ URL: http://math.semestr.ru/gauss/methodgauss.php](http://math.semestr.ru/gauss/methodgauss.php) – 10.10.2013 г. – Загл. с экрана
23. Бережная Е. В. Математические методы моделирования экономических систем. [Текст] : учеб. / Е. В. Бережная, В. И. Бережной ; – М. : Финансы и статистика, 2006. – 432 с. – ISBN 5–279–02940–8.
24. Спивак А. И. Механика горных пород [Текст] / А. И. Спивак. – М. : Недра, 1967. – 192 с.
25. Брылин В. И. Бурение скважин специального назначения [Текст] : учеб. пособие / В. И. Брылин – Томск. : ТПУ, 2006. – 255 с.
26. Барон Л. И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Том 1. Научно–методические основы. Разрушение резцовым инструментом. [Текст]: учеб. / Л. И. Барон, Л. Б. Глатман, Е. К. Рубенков ; – К. : Наука, 1968. – 216 с.
27. Поставка горно–шахтного оборудования. [Электронный ресурс] / FАst . – Режим доступа : [www/ URL:http://krommos.narod.ru/krom.htm](http://krommos.narod.ru/krom.htm) – 01.06.2011 г. – Загл. с экрана.
28. Направленный раскол породы электротехническими способами. [Электронный ресурс] / Мастерская своего дела. – Режим доступа : [www/ URL: http://msd.com.ua/dobycha-i-obrabotka-prirodnogo-kamnya/napravlennyj-raskol-porody-elektrotekhnicheskimi-sposobami](http://msd.com.ua/dobycha-i-obrabotka-prirodnogo-kamnya/napravlennyj-raskol-porody-elektrotekhnicheskimi-sposobami) – 2014 г. – Загл. с экрана.
29. Павлов С. М. Основы микроэлектроники [Текст] / С. М. Павлов. – Винница : ВНТУ, 2010. – 224 с.
30. Электротермические методы разрушения и обработки горных пород. [Электронный ресурс] / Студенческий клуб “Альтернатива”. Сборник научных трудов России. – Режим доступа : [www/ URL:http://www.cs-alternativa.ru/text/2335/2/](http://www.cs-alternativa.ru/text/2335/2/) – 2009 г. – Загл. с экрана.
31. Бурение грунтовых зондов, установка энергетических колодцев [Электронный ресурс] / Технологии бурения скважин. – Режим доступа : [www/ URL:http://teplozo](http://teplozo)

nd.ru/burenie-razvedochnyx-skvazhin/perspektivnye-sposoby-razrusheniya-gornyx-porod-pri-bureanii.html – 2014 г. – Загл. с экрана.

32. Ивоботенко Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике [Текст] : учеб. пособие / Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов ; под ред. Г. Ф. Филаретова ; – М. : Энергия, 1975. – 184 с. – (Университетская книга).

33. Ferri H. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave-assisted underground excavation [Text] / Hassani Ferri, Nekoovaght M. Pejman, Gharib Nima // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – Volume 8, Issue 1. – P. 1–15.

34. Vazhov V. F. Electric pulse breakdown and rock fracture in a coupled environment of increased pressure and temperature [Text] / V. F. Vazhov, S. Yu. Datskvich, M. Yu. Zhurkov, V. M. Muratov // Journal of Physics. – 2014. – Volume 552. – p. 2–5. doi:10.1088/1742-6596/552/1/012050.

35. Kweh S.W.K. Plasma-sprayed hydroxyapatite (HA) coatings with flame-spheroidized feedstock: microstructure and mechanical properties [Text] / S.W.K Kweh, K.A Khor, P Cheang // Biomaterials Journal. – 2000. – Volume 21, Issue 12. – P. 1223–1234.

36. Wright K.C. New fouling prevention method using a plasma gliding arc for produced water treatment [Text] / K. C. Wright, H. S. Kim, D. J. Cho, A. Rabinovich, A. Fridman, Y. I. Cho // Desalination Journal. – 2014. – Volume 345. – P. 64–71.

37. Yan F. Study on the interaction mechanism between laser and rock during perforation [Text] / Fei Yan, Yafei Gu, Yajun Wang, Chunming Wang // Optics & Laser Technology Journal. – 2013. – Volume 54. – P. 303–308.

38. Важов В.Ф. Электроимпульсный пробой и разрушение гранита [Текст] / В.Ф. Важов, Р.Р. Гафаров, С.Ю. Дацкевич, М.Ю. Журков, В.М. Муратов // Журнал технической физики. – 2010. – Том 80, Вып. 6. – С. 79–84.

39. Terentiev O. Features and disadvantages of fracture mechanics theories / O. Terentiev, A. Kleshchov // Journal “Nauka i Studia”. Series of Technical sciences.. – 2014. – №14. – P. 119–124. (включений до міжнародної бази даних eLibrary).

40. Терентьев О. М. Формирование комбинированного разрушения горных пород взрыво-механическими нагрузками / О. М. Терентьев, П. А. Гонтарь, А. И. Клещёв // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – №6. – С. 131–136. (включений до міжнародних баз даних: Ulrich's Web Global Serials Directory, eLibrary, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Inspec, Open Academic Journals Index (OAJI), Google Scholar, CiteFactor, Scientific Indexing Services).

41. Kleshchov A. Internal energy resources excitation with the help of sub-resonant device based on the Tesla coil [Text] / A. Kleshchov // IX International Students Conference. Book of abstracts "Innovations in Science and Technology". – 2012. – №9. – Р. 67.

42. Терентьев О. М. Синтез умов вибору енергоощадної технології руйнування [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Международная научно-практическая и учебно-методическая конференция. Сб. науч. работ «Сталий енергетичний розвиток: Сучасні тенденції, технології та рішення». – 2014. – С. 51.

43. Залізні руди [Електронний ресурс] / Вікіпедія. Вільна енциклопедія. – Режим доступу : [www/ URL: http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7%D0%BD%D1%96_%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%B8/](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7%D0%BD%D1%96_%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%B8/) – 19.08.2014 р. – Загол. з екрану.

44. Кремній [Електронний ресурс] / Мінерали та породи. – Режим доступу : [www/ URL: http://answers.in.ua/shho-take-kremnij/](http://answers.in.ua/shho-take-kremnij/) – 19.08.2014 р. – Загол. з екрану.

45. Кальцит [Електронний ресурс] / Вікіпедія. Вільна енциклопедія. – Режим доступу : [www/ URL: http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%B8%D1%82/](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%B8%D1%82/) – 19.08.2014 р. – Загол. з екрану.

46. Магнезит – тальковый (горький) шпат [Электронный ресурс] / Каталог минералов. ru. – Режим доступа : [www/ URL: http://www.catalogmineralov.ru/article/363.html#/](http://www.catalogmineralov.ru/article/363.html#/) – 19.08.2014 г. – Загл. с экрана.

47. Славутский Л. А. Основы регистрации данных и планирование эксперимента [Текст] / Л. А. Славутский. – Чебоксары. : Изд-во ЧГУ, 2006. – 200 с.

48. Зевин М. Б. Справочник молодого электромонтера [Текст] : учеб. / М. Б. Зевин, Е. П. Парини ; – М. : Высш. шк., 1984. – 192 с., ил.

49. Ташлинский А. Г. Ортогональные и рототабельные центральные композиционные планы эксперимента [Текст] : метод. указ. / А. Г. Ташлинский, Г. Л. Минкина ; КНУ им. Т. Г. Шевченко. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 39 с. – Библиогр. : С. 14–20.

50. Таблиці критичних значень основних статистичних критеріїв. Методична розробка для практичних занять з дисципліни „Основи статистичного обліку в екології” для курсантів та студентів напряму підготовки 6.040106 „Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування”. [Текст] : метод. вказ. / М. А. Петрова; Інститут цивільного захисту. – Львів : ЛДУБЖ, 2012. – 10 с.

51. Вентцель Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М. : Высш. Шк., 1999. – 576 с.

52. Терентьев О. М. Модель експериментальних досліджень руйнування породи індуктивною плазмою / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Науковий журнал «ЕНЕРГЕТИКА. Технологія, економіка, екологія». – 2014. – С. 51–54. (включений до міжнародних баз даних: Open Academic Journal Index (OAJI), WorldCat, BASE, Polska Bibliografia Naukowa, Academic Journal Index, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Infobase Index, Real Time Impact Factor).

53. Терентьев О. М. Планування експерименту руйнування кристалічних структур потоками індуктивної плазми / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов, П. А. Гонтарь // Журнал «Вісник Тернопільського національного технічного університету». – 2015. – №1. – С. 134–142.

54. Система руйнування індуктивною плазмою [Текст] : пат. 27685 Україна: МПК Н 01 S 4/00, Е 21 В 41/00 / Терентьев О. М., ; винахідники і власники О. М. Терентьев, А. Й. Кleshchov. – № 2-19-14-4235-А ; заявл. 07.10.13 ; опубл. 10.02.14, Бюл. № 3. – 4 с.

55. Terentiev O. Exact methods of linear programming for choosing rock failure conditions [Text] / O. Terentiev, A. Kleshchov // Materials of the International Scientific-Practical Conference “Theoretical and applied science”. – 2013. – №11. – P. 52–57.

56. Терентьев О. М. Модель експериментальних досліджень керованого електротермічного впливу індуктивною плазмою на породу [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Кleshchov // Тези конференції «Другі аспірантські читання пам'яті д.т.н., проф. А. В. Праховника». – 16–17.04.2014. – С. 19–20.

57. Баранов М. И. Приближенный расчет максимальной температуры плазмы в сильноточном канале искрового разряда высоковольтного воздушного коммутатора атмосферного давления [Текст] / М. И. Баранов // Журн. «Технічна електродинаміка». – 2010. – №5. – С. 18–21.

58. Handbook of Physical Constants [Text] / Sydney P. Clark Jr. Editor. – Yale University, New Haven, Connecticut : PUBLISHED BY THE SOCIETY, 1966. – 543 p.

59. Ключарев А. Н. Введение в физику низкотемпературной плазмы [Текст] : учеб. пособие / А. Н. Ключарев, В. Г. Мишаков, Н. А. Тимофеев; – СПб. : СПбГУ, 2008. – 224 с.

60. Фортов В. Е. Физика неидеальной плазмы [Текст] : учеб. пособие / В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, И. Т. Якубов ; под общ. ред. М. Б. Козинцова ; – М. : Физматлит, 2004. – 528 с. – ISBN 5–9221–0173–0.

61. Денисюк Т. Д. Электроразрядная очистка поверхностей технологического оборудования от нежелательных неметаллических отложений [Текст] / Т. Д. Денисюк, А. Р. Ризун, Ю. В. Голень // Журн. «Электронная обработка материалов». – 2007. – №6. – С. 50–52.

62. Коляда Ю. Е. Возбуждение упругих импульсов мощными плазменными сгустками в акустическом волноводе [Текст] / Ю. Е. Коляда, В. И. Федун // Журн.

Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2008. – № 4 (6). – С. 260 – 263.

63. Ризун А. Р. Электроразрядная технология – перспективный путь создания водно–угольного топлива [Текст] / А. Р. Ризун, Ю. В. Голень, Т. Д. Денисюк, И. Р. Ризун // Журн. Наукові праці. Серія: Техногенна безпека. – 2011. – № 151 (163). – С. 20 – 23.

64. Краткий справочник физико–химических величин. Издание десятое, испр. И дополн. [Текст] / Под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой. – СПб. : «Иван Федоров», 2003. – 240 с., ил. ISBN 5–8194–0071–2.

65. Насонов А. А. Элементы электрических цепей и основные методы их расчета: учебно–методическое пособие по курсу «Электрорадиотехника» для студентов физико–математического факультета специальностей «физика–математика», «математика–физика» [Текст] / А. А. Насонов. – Воронеж. : Воронежский государственный педагогический университет, 2010. – 56 с.

66. Иродов И. Е. Квантовая физика. Основные законы. [Текст] / И. Е. Иродов. – М. : Высш. школа, 1985. – 271 с.

67. Николаева Е. А. Основы механики разрушения [Текст] / Е. А. Николаева. – Пермь. : ПГТУ, 2010. – 103 с.

68. Митюрёв К. В. Механизмы повреждения оболочек твэлов ядерных реакторов на быстрых нейтронах при высокодозном нейтронном облучении [Текст] : автореф. дис. к–та физ. – мат. наук : 16.01.13 / К. В. Митюрёв ; [Национальный исследовательский ядерный уе–т МИФИ] . – М., 2012. – 23 с.

69. Брандт Н. Б. Квазичастицы в физике конденсированного состояния [Текст] Н. Б. Брандт, В. А. Кульбачинский М.: Физматлит – 2007, 632 с. ISBN 978–5–9221–0813–3.

70. Гуртов В. А. Физика твердого тела для инженеров [Текст] : учеб. / В. А. Гуртов, Р. Н. Осауленко ; КНУ им. Т. Г. Шевченко. – М. : Техносфера, 2007. – 502 с. – Библиогр. : с. 72–75. – ISBN 978–5–94836–141–3.

71. G – теория химической связи [Электронный ресурс] / Институт теоретической химии. – Режим доступа : [www/ URL: http://itchem.ru/g_-_teoriya_himicheskoy_svyazi/](http://www.itchem.ru/g_-_teoriya_himicheskoy_svyazi/) – 19.08.2014 г. – Загл. с экрана.

72. К вопросу о металлической связи в плотнейших упаковках химических элементов [Электронный ресурс] / [SciTecLibrary](http://www.sciteclibrary.ru). – Режим доступа : [www/ URL: http://www.sciteclibrary.ru/texsts/rus/stat/st596.htm](http://www.sciteclibrary.ru/texsts/rus/stat/st596.htm) – 19.08.2014 г. – Загл. с экрана.

73. Фролов В. В. Химия: учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов [Текст] / В. В. Фролов. – М. : Высш. школа, 1986. – 543 с.

74. Солодовников С. Ф. Основные термины и понятия структурной кристаллографии и кристаллохимии. Словарь-пособие [Текст] / С. Ф. Солодовников. – Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2005. – 113 с.

75. Кварц [Электронный ресурс] / © Каталог Минералов. – Режим доступа : [www/ URL: http://www.catalogmineralov.ru/mineral/48.html](http://www.catalogmineralov.ru/mineral/48.html) – 19.08.2014 г. – Загл. с экрана.

76. Гематит [Электронный ресурс] / © Горная энциклопедия. – Режим доступа : [www/ URL: http://www.mining-enc.ru/g/gematit/](http://www.mining-enc.ru/g/gematit/) – 19.08.2014 г. – Загл. с экрана.

77. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород [Текст] / под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодяконова. – М. : Недра, 1975. – 279 с.

78. Производство спеченого магнезита [Электронный ресурс] / © msd.com.ua. – Режим доступа : [www/ URL: http://msd.com.ua/texnologiya-ogneuporov/proizvodstvo-spechennogo-magnezita/](http://msd.com.ua/texnologiya-ogneuporov/proizvodstvo-spechennogo-magnezita/) – 19.08.2014 г. – Загл. с экрана.

79. Анурьев В. И. Справочник конструктора–машиностроителя в 3т. Т. 1 [Текст] / В. И. Анурьев; 8-е изд., перераб и доп. Под ред. И. Н. Жестковой — М.: Машиностроение, 2001. — С. 34. ISBN 5–217–02963–3.

80. Додис Я. М. Разрушение горных пород при бурении и взрывании [Текст] Я. М. Додис, В. И. Нифадьев – Бишкек: КРСУ, 2006. – 374 с.

81. Терентьев О. М. Фізико–технічні основи видобутку корисних копалин з енергоощадним руйнуванням молекулярних зв'язків гірських порід [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / О. М. Терентьев. – К., 2008. – 284 с.
82. Радиодетали, радиокомпоненты и их расчет [Текст] : учеб. / В. И. Возненко, А. В. Коваль, В. М. Коронкевич и др. ; под общ. ред. А. В. Коваля. – КНУ им. Т. Г. Шевченко. – М. : «Сов. радио», 1977. – 368 с.
83. Материалы с необычными свойствами [Электронный ресурс] / Общий каталог материалов. – Режим доступа : [www/ URL: http://anomal.unicor.ru/effects/catalog/all/byName/index.html/](http://www.anomal.unicor.ru/effects/catalog/all/byName/index.html/) – 15.05.2014 г. – Загл. с экрана.
84. Новая модель странного поведения ауксетиков [Электронный ресурс] / Люди. Идеи. Технология. – Режим доступа : [www/ URL: http://www.membrana.ru/particle/4322/](http://www.membrana.ru/particle/4322/) – 15.05.2014 г. – Загл. с экрана.
85. Хрупко–пластичный переход и ангармонизм межатомных колебаний [Текст] : Материалы международного научного симпозиума «Актуальные проблемы прочности», 27 сентября – 1 октября 2010 г. Витебск, Беларусь / редкол. Е. В. Черняева (отв. ред.). – Витебск, Беларусь, 2010. – С. 151.
86. Садовников С. И. Тепловое расширение наноструктурированных пленок PbS и ангармонизм атомных колебаний [Текст] / С. И. Садовников, А. И. Гусев // Журн. Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56, № 11. – С. 2274 – 2278.
87. Miroshnichenko A. E. Engineering Fano resonances in discrete arrays [Text] / A. E. Miroshnichenko, S. Kivshar Yu // Phys. Rev. E. – 2005. – Vol. 72. – P. 056611 1 – 7.
88. Miroshnichenko A. E. Nonlinear Fano resonance and bistable wave transmission [Text] / A. E. Miroshnichenko, S. F. Mingaleev, S. Flach, S. Kivshar Yu // Phys. Rev. – 2005. – Vol. 71. – P. 036626 1 – 8.
89. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. I [Текст] : учеб. пособие / Г. М. Островский, Р. Ш.

Абиев, В. М. Барабаш и др. ; под общ. ред. Г. М. Островского. – С. –Пб. : АНО НПО «Профессионал», 2004. – 848 с., ил.

90. Рудакова Р. П. Практикум по статистике [Текст] : учеб. пособие / Р. П. Рудакова, Л. Л. Букин, В. И. Гаврилов ; под общ. ред. В. Мамаева ; – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Питер, 2007. – 288 с., ил. – ISBN 978-5-91180-481-7.

91. Деревянкин В. В. Энергетические показатели разрушения железистых кварцитов на карьере Стойленского ГОКа [Текст] / В. В. Деревянкин // Журн. Горный информационно – аналитический бюллетень (научно – технический журнал). – 2001. – № 12 / 2001. – С. 283 – 284.в

92. Гладаревский Р. А. Разработка взрывного ресурсосберегающего способа разрушения железистых кварцитов при их рудоподготовке [Текст] : автореф. дис. к-та техн. наук : 25.00.20 / Р. А. Гладаревский ; [Московский государственный горный университет] . – М., 2006. – 36 с.

93. Ткач В. В. Термодинамический критерий оценки работы измельчительных аппаратов в горнорудной промышленности [Текст] / В. В. Ткач, Т. В. Орел // Журн. Гірничий вісник. – 2006. – № 91(2006). – С. 169 – 173.

94. Станок буровой шарошечный СБШ-250 [Электронный ресурс] / РУДГОРМАШ. – Режим доступа : [www/ URL: http://www.rudgormash.ru/?mcat=1336&rec=54693818/](http://www.rudgormash.ru/?mcat=1336&rec=54693818/) – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана.

95. Каталог оборудования [Электронный ресурс] / СпецОборудованиеМаркет : [www/ URL: http://somrf.com/blog/burovye-stanki-ispolzuemye-na-karerakh-rossii-i-zarubezhom/](http://somrf.com/blog/burovye-stanki-ispolzuemye-na-karerakh-rossii-i-zarubezhom/) – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана.

96. Буровые установки для открытых горных работ [Электронный ресурс] / Горные инструменты. – Режим доступа : [www/ URL: http://www.gortools.ru/cat/35.html/](http://www.gortools.ru/cat/35.html/) – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана.

97. Применение бурового оборудования INGERSOLL-RAND на разрезе «Тугнуйский» [Электронный ресурс] / Научно-технический журнал «Горная промышленность». – Режим доступа : [www/ URL: http://www.gornaya-promyshlennost.ru/](http://www.gornaya-promyshlennost.ru/)

<http://www.mining-media.ru/ru/article/burovovoe/2089-primenenie-burovogo-oborudovaniya-ingersoll-rand-na-razreze-tugnujskij/> – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана.

98. Технологический расчет основных процессов открытых горных работ [Электронный ресурс] / Библиофонд. Электронная библиотека студента. – Режим доступа : [www/ URL: http://bibliofond.ru/view.aspx?id=437562/](http://bibliofond.ru/view.aspx?id=437562/) – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана.

99. Terentiev O. Mathematical representation of compaction core height when medium crystal structure failure / O. Terentiev, A. Kleshchov // HERALD of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Series of Mining: Collection of scientific works.. – 2012. – №22. – Р. 16–25. (включений до міжнародних баз даних: Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI), CiteFactor, ResearchBib, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OpenAIRE, Universal Impact Factor (UIF)).

100. Терентьев О. М. Вплив анізотропії на модуль Юнга при ослабленні кристалічних структур потоками індуктивної плазми / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Науковий журнал «Науково-технічна інформація». – 2015. – №4. – С. 49–52.

101. Terentiev O. Subresonant load energy regulation when electrothermal rock fracturing / O. Terentiev, A. Kleshchov // HERALD of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Series of Mining: Collection of scientific works.. – 2015. – №29. – Р. 10–18. (включений до міжнародних баз даних: Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI), CiteFactor, ResearchBib, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OpenAIRE, Universal Impact Factor).

102. Терентьев О. М. Руйнування молекулярних зв'язків гірських порід [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Матеріали науково-технічної конференції ІЕЕ НТУУ «КПІ». Зб. наук. праць «Енергетика. Екологія. Людина». – 2012. – С. 394–398.

103. Клещов А. Й. Проекція ансамблів геометрії ядра ущільнення на атомарну структуру середовища [Текст] / А. Й. Клещов // Матеріали міжнародної

наукової конференції. Зб. наук. праць «Технологический аудит и резервы производства». – 2012. – №3/1 (5). – С. 25–26.

104. Терентьев О. М. Модель возникновения ядра уплотнения в системе «Энергетический источник – среда» [Текст] / О. М. Терентьев, А. И. Клещев // Международная научно-практическая конференция. Сб. науч. трудов «Badania naukowe. Teoria I praktyka». – 2012. – С. 67–78.

105. Терентьев О. М. Формування фемтоструктур ущільнення при руйнуванні кристалічної поливального середовища [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Матеріали науково-практичної конференції. Зб. наук. праць «Технологический аудит и резервы производства». – 2012. – Т.1, №6/1 (8). – С. 7–13.

106. Терентьев О. М. Снижение энергоемкости разрушения ГП субрезонансными нагрузками [Текст] / О. М. Терентьев, А. И. Клещев // Материалы VII международной научно-технической конференции ИЭЭ НТУУ «КПИ». Сб. науч. трудов «Энергетика. Экология. Человек.». – 2015. – С. 29–34.

107. Приготовление образцов для металлографического исследования микроструктуры [Текст] : учеб. пособие / С. В. Литовченко, В. Г. Кириченко, Е. А. Доценко, С. Ю. Кочетова . – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. – 18 с

108. Система шлифования горной породы [Электронный ресурс] / Новавест. Инновационные решения для пробоподготовки и металлографии. – Режим доступа : [www/ URL: http://www.novatest.ru/equipment/1190/1201/1227/](http://www.novatest.ru/equipment/1190/1201/1227/) – 15.05.2014 г. – Загл. с экрана.

109. Казанцев С. Г. Полярная и ретикулярная анизотропия микротвердости перспективных пьезоэлектриков [Текст] / С. Г. Казанцев, Т. Н. Овчаренко // Журн. Вопросы электромеханики. – 2011. – Т. 123. – С. 41 – 50.

110. Brandon D. Microstructural characterization of materials [Text] : book / D. Brandon, W. Kaplan ; – Chichester : Wiley, 1999. – 409 p. – ISBN 0471985015.

111. Woodruff D. Modern techniques of surface science [Text] : book / D. Woodruff, T. Delchar ; department of physics, University of Warwick : Cambridge University Press, 1994. – 337 p. – ISBN 9780511623172.

112. ГОСТ 8711–93. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 2. Особые требования к амперметрам и вольтметрам. [Текст]. – Введ. 1993–10–21. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1993. – 16 с.

113. ГОСТ 6118–59. Конденсаторы бумажные герметические типа КБГ на напряжение до 1500 В. [Текст]. – Введ. 1959–06–18. – М. : Госстандарт СССР, 1959. – 21 с.

114. ГОСТ 8.286–78. Секундомеры электрические. Методы и средства поверки. [Текст]. – Введ. 1978–03–13. – М. : Госстандарт СССР, 1978. – 7 с.

115. ISO 14577–1:2002. Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 1: Test method [Text]. – Ins. 2002–09–11. – by Technical Committee ISO/TC 164, Mechanical testing of metals, Subcommittee SC 3, Hardness testing, 2002. – 19 p.

116. Гришин Ю. М. Экспериментальное исследование финишного этапа обогащения кварца в плазменных потоках [Текст] / Ю. М. Гришин, Н. П. Козлов, А. Ю. Кулагин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 10. – С. 1 – 14. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1027.html>

117. ГОСТ Р 8.748–2011. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. [Текст]. – Введ. 2011–12–13. – М. : Госстандарт СССР, 2011. – 24 с.

118. Terentiev O. Mechanism of creating the prefracture zone of rock formations with magnetic and hydrocavitation load / O. Terentiev, A. Kleshchov, I. Streltsova // Scientific and Technical Journal «Metallurgical and Mining Industry».. – 2015. – №4. – P. 353–355. (включений до міжнародних баз даних: Scopus, Index Copernicus, eLibrary, Scientific Indexing Services, Academic Resource Index “ResearchBib”, WorldCat, Eurasian Scientific Journal Index, International Innovative Journal Impact Factor, UlrichsWeb).

119. ГОСТ Р МЭК 60079–0–2011. Взрывоопасные среды. Оборудование. Общие требования. [Текст]. – Введ. 2012–07–01. – М. : Стандартиформ, 2012. – 150 с.

120. ГОСТ Р 60079–15–2009. Взрывоопасные среды. Часть 15. Оборудование с видом защиты «п». [Текст]. – Введ. 2009–12–27. – М. : Стандартиформ, 2009. – 75 с.

121. Рекомендации по устройству электроустановок во взрывоопасных зонах газовой промышленности. 02.06.01.170.03. Выпуск 1. [Текст]. – Введ. 1999–06–23. – М. : Управление энергетики ОАО «Газпром», 1999. – 21 с.

122. ГОСТ Р 52350.28–2007. Взрывоопасные среды. Часть 28. Защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение. [Текст]. – Введ. 2007–06–14. – М. : Стандартиформ, 2007. – 28 с.

123. Zhangjiakou Xuanhua Huatai Mining & Metallurgical Machinery Co., Ltd. [Электронный ресурс] / Tianjin xin'gang. – Режим доступа : [www/ URL: http://russian.alibaba.com/product-gs/boomer-494479956.html/](http://www.russian.alibaba.com/product-gs/boomer-494479956.html/) – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана.

124. Постановление Минтруда РФ "об утверждении укрупненных нормативов времени на горнопроходческие и нарезные горные работы шахт и рудников горнодобывающей промышленности и в геологоразведке" № 89 [Текст] : – Утв. Минтруда РФ 21.04.93. – Изд. офиц. – М. : Минтруда РФ, 1993. – 134 с

125. ДСТУ 2825–94 Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять [Текст] . – Введ. 1998–01–01. – К. : ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 1998. – 42 с.

126. ТКП 17.08–17–2012 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов загрязняющих веществ от предприятий по производству цемента и извести [Текст] . – Введ. 2012–10–19. – Минск : Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, 2012. – 47 с.

127. Киотский протокол к рамочной конвенции организации объединенных наций об изменении климата [Текст] : – Утв. ООН 15.03.99. – Изд. офиц. – Нью-Йорк : ООН, 1998. – 134 с

128. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений (утв. Постановлением гкнт ссср, госпланом ссср, академией наук ссср, госкомизобретений ссср от 14.02.1977 п 48/16/13/3)

129. «Житомиробленерго» [Электронный ресурс] / ПАТ «Житомиробленерго». – Режим доступа : [www/ URL: http://www.ztoe.com.ua/tariff.php](http://www.ztoe.com.ua/tariff.php) / – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана

130. Погуда Н. В. Нормативний коефіцієнт ефективності інвестицій як індикатор прийняття інвестиційних рішень [Текст] / Н. В. Погуда // Журн. Формування ринкової економіки : зб. наук. пр. – Вип. 23. – 2010. – С. 381–390.

131. Витратні матеріали Atlas Copco COP 44 QL 40 COP 54 QL 50 COP 64 DTH-8311090550 [Электронный ресурс] / bizorg. – Режим доступа : [www/ URL: http://bizorg.su/pnevmodarniki-r/p2337870-pnevmodarniki-atlas-copco-cop-44-ql-40-cop-54-ql-50-cop-64-dth8311090550](http://bizorg.su/pnevmodarniki-r/p2337870-pnevmodarniki-atlas-copco-cop-44-ql-40-cop-54-ql-50-cop-64-dth8311090550) / – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана

132. ДСТУ 3974 – 2000. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання дослідно – конструкторських робіт. Загальні положення. [Текст] . – Введ. 2001–07–01. – К. : ДЕРЖСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2001. – 31 с.

133. Правила визначення вартості проектно-дослідницьких робіт. № 89 [Текст] : ДБН Д.1.1–7–2000. – Затв. Держкомітет будівництва, архітектури та житлової політики України 14.02.2000. – Вид. офіц. – К. : ДПАЖПУ, 2001. – 34 с.

134. Определение стоимости работ по монтажу и демонтажу машин и оборудования [Электронный ресурс] / Мастерская своего дела. – Режим доступа : [www/ URL: http://msd.com.ua/ocenka-stoimosti-oborudovaniya/opredelenie-stoimosti-rabot-po-montazhu-i-demontazhu-mashin-i-oborudovaniya/](http://msd.com.ua/ocenka-stoimosti-oborudovaniya/opredelenie-stoimosti-rabot-po-montazhu-i-demontazhu-mashin-i-oborudovaniya/) / – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана.

135. Product Double Boom Drilling Jumbo heighhoiu [Электронный ресурс] / Qingdao Grandplan Technology Co., Ltd. – Режим доступа : [www/ URL: http://ru.made-in-china.com/co_gpminingmachine/product_Double-Boom-Drilling-Jumbo_heighhoiu.html](http://www.ru.made-in-china.com/co_gpminingmachine/product_Double-Boom-Drilling-Jumbo_heighhoiu.html) / – 20.12.2014 г. – Загл. с экрана.

136. ЛАТР – автотрансформаторы лабораторные [Электронный ресурс] / Интернет–магазин электротоваров и монтажных изделий «DoLadu» г. Киев, ул. Бориспольская, 7. – Режим доступа : [www/ URL: http://doladu.com.ua/latr/](http://doladu.com.ua/latr/) – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана.

137. НОМ – 10. Трансформатор напряжения [Электронный ресурс] / Вектор–Альфа, ООО. – Режим доступа : [www/ URL: http://vectoralfa.prom.ua/p5837691-nom10-transformator-napryazheniya.html/](http://vectoralfa.prom.ua/p5837691-nom10-transformator-napryazheniya.html/) – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана.

138. Обмоточный эмаль провод ПЭТ–155 [Электронный ресурс] / Интернет – магазин ЧП "Tracker". – Режим доступа : [www/ URL: http://metdet.ucoz.ua/shop/39/desc/pet-155_0-45mm_1kg/](http://metdet.ucoz.ua/shop/39/desc/pet-155_0-45mm_1kg/) – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана.

139. Провод соединительный ВПП 4,0 [Электронный ресурс] / Торговый дом «ОДЕСКАБЕЛЬ». – Режим доступа : [www/ URL: http://tdok.com.ua/ru/products/details/provod_soedinitel_nyj_vpp_4_0/index.html/](http://tdok.com.ua/ru/products/details/provod_soedinitel_nyj_vpp_4_0/index.html/) – 19.12.2014 г. – Загл. с экрана.

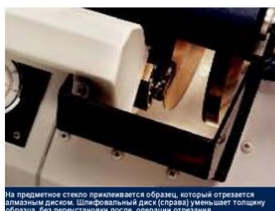
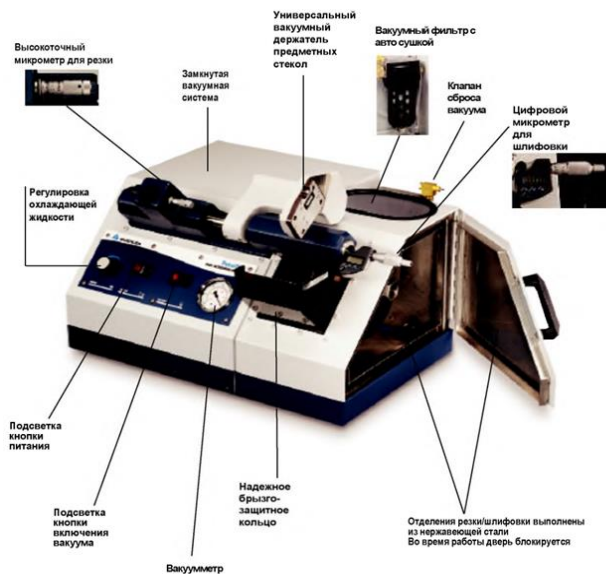
140. Терентьев О. М. Обґрунтування параметрів плазмо-механічного руйнування гранітів [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», 36. наук. праць «Перспективи розвитку гірничої справи і підземного будівництва». – Випуск № 7. – 1–3.06.2016. – С. 6–11.

ДОДАТОК А

Використане вимірювальне обладнання

Система шліфування зразків PetroThin, Buehler

PetroThin призначена для шліфування геологічних зразків, таких як кам'яні породи та мінерали, кераміка, вогнетривкі матеріали, бетон і т. і. шорсткістю до 35 мкм, рисунки А1, А2.



На предметное стекло приклеивается образец, который отрезается алмазным диском. Шлифовальный диск (справа) уменьшает толщину образца без повреждения после операции шлифовки.

PetroThin – Шлифовальная система предназначена для большинства петрографических слайдов

1.06 x 1.81 дюйма	27 x 46 мм
1 x 3 дюйма	25.4 x 76.2 мм
1½ x 3 дюйма	38.1 x 76.2 мм
2 x 2 дюйма	50.8 x 50.8 мм
2 x 3 дюйма	50.8 x 76.2 мм

Рисунок А1 – 1й лист специфікації PetroThin, Buehler

Спецификация

38-1450-160 PetroThin: коррозионно-стойкая рабочая зона, отделение резки и шлифовки выполнено из нержавеющей стали, алмазный отрезной диск Ø203мм, алмазный чашеобразный шлифовальный круг Ø203мм, цифровой микрометр регулирующий толщину реза, цифровой микрометр регулирующий толщину слоя стачивания, встроенный вакуумный насос с фильтром, держатель предметного стекла, двигатель 3 л.с. (250 Вт), питание 115В/60Гц/1.

38-1450-250 PetroThin – тоже что №. 38-1450-160 , но с питанием 220В/50Гц/1.

Запасные части

Штифты – держатели предметных стекол	1450S044	Цифровой микрометр для шлифовки	R9321
Запасная батарейка к микрометру	R8716	Цифровой микрометр для резки	1450S036

Аксессуары PetroThin®

Описание	Размер	Номер по каталогу
Алмазный отрезной диск	8" x 0.055" x 1" (203мм x 1.4мм x 25.4мм)	11-4278
CBN отрезной диск	8" x 0.055" x 1" (203мм x 1.4мм x 25.4мм)	11-4280
Алмазный чашеобразный шлифовальный круг	8" x ¼" x 1" (203мм x 6.35мм x 25.4мм)	40-4508
CBN чашеобразный шлифовальный круг	8" x 0.055" x 1" (203мм x 1.4мм x 25.4мм)	40-4512
Брусок для заточки	½" x ½" x 4" (12.7мм x 12.7мм x 102мм)	40-4510

* рекомендуется для железистых, легированных и неметаллических суперсплавов

Петрографические стекла и защитные стекла

Описание	Дюймы	Миллиметры	Количество	Номер по каталогу
Предметное стекло	1.06 x 1.81	27 x 46	(144)	40-8000-001
Предметное стекло	1.06 x 1.81	27 x 46	(1440)	40-8000-010
Предметное стекло	3 x 1	76.2 x 25.4	(1440)	40-8002-010
Предметное стекло, защитное	0.94 x 1.54	24 x 39	(1440)	40-8008-010
Предметное стекло, защитное	0.98 x 1.18	25 x 30	10 x 1000 шт.	40-8007-010

Клей

Описание	Кол-во/Вес	Номер по каталогу
Lakeside 70 Cement	12 bars	40-8100
Бальзам	4 оз. (113 гм)	40-8110-004
Бальзам	1 lb (0.45кг)	40-8110-016
ALCO Воск	0.70 оз. (20гм)	40-8120

Петрографическое оборудование

Описание	Номер по каталогу
PetroVue® - устройство просмотра тонких шлифов	30-8050
PetroBond® - устройство прижима образцов	38-1490
UltraMet® 2005 - система звуковой очистки	75-2005
Cast N' Vac - вакуумная система пропитки	20-3510

Ероху

Описание	Кол-во/Вес	Номер по каталогу
EpoxiCure® смола	1 шт. (0.95л)	20-8130-032
EpoxiCure® смола	1 гал. (3.8л)	20-8130-128
EpoxiCure® отвердитель	½ pt. (0.24л)	20-8132-008
EpoxiCure® отвердитель	1 шт. (0.95л)	20-8132-032
EpoHeat® смола	1 шт. (0.95л)	20-8120-032
EpoHeat® отвердитель	1 pt. (0.47л)	20-8122-016
EpoThin® смола	1 шт. (0.95л)	20-8140-032
EpoThin® смола	1 гал. (3.8л)	20-8140-128
EpoThin® смола	1 pt. (0.47л)	20-8142-016
EpoThin® отвердитель	64 оз. (1.9л)	20-8142-064



BUEHLER GMBH
In der Steele 2 • 40599 Düsseldorf
Postfach 16 03 55 • 40566 Düsseldorf
Telefon: (+49) 0211/974100 • Telefax: (+49) 0211/9741079
Web Site: <http://www.buehler-met.de>
Email: info@buehler-met.de



125130, г. Москва, Старопетровский проезд, д 7А
Тел.: +7 (495) 788-55-24
www.novatest.ru

У корпусі з нержавіючої сталі закріплені алмазний відрізний диск діаметром 203 мм та алмазний шліфувальний диск діаметром 203 мм. Вакуумний тримач для кріплення тонких шліфів регулюється під один з п'яти розмірів предметного скла за допомогою штифтів. Вбудований вакуумний насос забезпечує вакуум для утримування зразка на місці під час різання та шліфування. Вбудована система фільтрації видаляє вологу з вакуумної магістралі під час роботи і автоматично висушує під час кожного вмикання насоса. Алмазні відрізний і шліфуючий диски закріплені на одному валу. Два цифрових високоточних мікрометра використовуються для контролювання товщини зрізу та шліфування. Мікрометр, що контролює зріз, градуйований з точністю до 0,01 мкм і може бути заблокований в будь-якому положенні, що дозволяє різати повторно зразки на встановлену товщину [95]. Мікрометр градуйований в дюймах та мікрометрах і має ЖК дисплей для зчитування інформації.

Мікротвердомір Larey Technologys МН

Мікротвердоміри серії МН призначені для проведення вимірювань твердості конструкційних матеріалів та гірських порід. Larey Technologys МН дозволяють отримати відбитки по Віккерсу і Кнуппу в діапазоні навантажень від 0,01 Н до 1,50 Н. Дисплей рідкокристалічний 5 виводить значення глибини відбитку індентора 3 та сили його вдавлювання. Модель мікроскопом вимірюючим 2. Для візуального контакту при налаштуванні використовується окуляр 1. ГП розташовується тисках прецизійних 4.

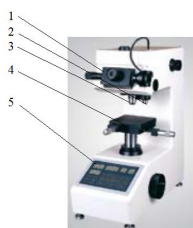


Рисунок А3 – Мікротвердомір Larey Technologys МН, де 1 – окуляр, 2 – мікроскоп вимірюючий, 3 – індентор, 4 – тиски прецизійні, 5 – дисплей рідкокристалічний

Растровий електронний мікроскоп РЕМ–106И

В основу роботи растрового електронного мікроскопу покладено сканування поверхонь зразків сфокусованим електронним потоком з електронної пушки 2, рисунок А4. Зображення об'єкта, що досліджується, є результатом взаємодії потоку електронів з поверхнею зразка. Кожна точка зразка послідовно опромінюється сфокусованим електронним потоком, який переміщується по досліджуваній поверхні із заданим кроком переміщення.

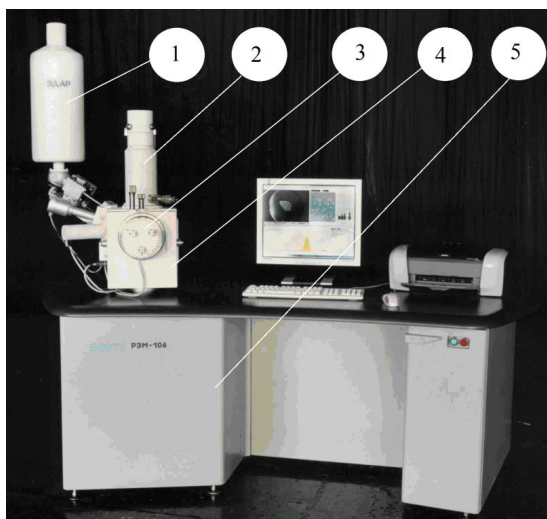


Рисунок А4 – Загальний вигляд РЕМ – 106И, де 1 – охолоджуюча система, 2 – електронна пушка з вольфрамовим катодом, 3 – механізм для переміщення зразків, 4 – вакуумна камера, 5 – вакуумна система насосів.

Охолоджуюча система 1 РЕМ – 106И використовується для створення вакууму. Пари азоту, рідка форма якого заливається у бак, створює розріджене середовище у камері для зразків. Механізм для переміщення зразків 3 дає можливість ручного налаштування переміщення зразків у камері 4. За допомогою системи насосів 5 здійснюється відкачування та закачування повітря.

Цифровий мікротвердомір з автоматичним поворотом Larey Technology

Прилад призначений для визначення залежності сили вдавлювання індентора від глибини відбитку індентора у гірських породах, рисунок А5.

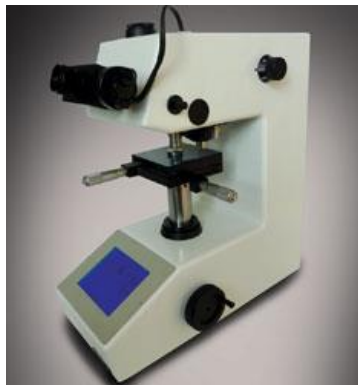


Рисунок А5 – Вигляд мікротвердоміру Larey Technology

Тестові навантаження: 10, 25, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 гс відповідно до стандартів ASTM E-384, ISO / DIS6507-2. Сенсорне управління з великим екраном, з автоматичним методом навантаження і відпускання. Складається з: координатного X-Y столика (110 x 110 мм), прецизійні лещата, алмазний індентером-пірамідка, вимірювальний мікроскоп (з 10х окуляром, електронного типу), об'єктив 10х, об'єктив 40х, опорні ніжки з можливістю регулювання висоти, відеоадаптер для камери. Технічні характеристики

- Механізм програми навантаження: автоматичне навантаженні та розвантаженні (50 мкм / сек)
- Час програми навантаження: 5 ~ 99 сек
- Револьверне пристрій (турель): Автоматична
- Об'єктиви: 40х, 10х
- Макс. висота зразка: 90 мм
- Шкали вимірювання твердості: HV, НК
- Координатний столик:
 - о З ручним керуванням

о Розміри 110mm x 110mm

о Макс. переміщення 25mm x 25mm

Точність: Відповідає вимогам JJG260–91, JIS B–7734, ASTM E–384 та ISO 146

Прилад для документування: приєднання фото– або відеокамери, програмне забезпечення.

Портативний прилад електровимірювання АКТАКОМ АСМ–3192

Прилад призначений для роботи з однофазними і трифазними промисловими і побутовими електромережами постачання, рисунок А6.

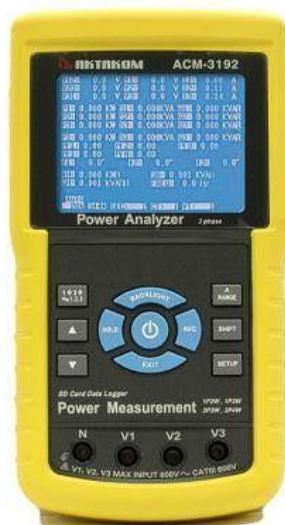


Рисунок А6 – Вигляд приладу АКТАКОМ АСМ–3192

При роботі в однофазних мережах прилад АКТАКОМ АСМ–3 192 дозволяє проводити аналіз, як на двох, так і трипровідних лініях, а при роботі з трифазними мережами – на трьох– і чотирипровідних лініях. Вимірювач потужності АКТАКОМ АСМ–3 192 є аналізатором якості електроенергії та дозволяє обчислювати параметри якості електроживлення, а не тільки потужність, у тому числі:

- змінна напруга (природно TRUE RMS): від 10 В до 600 В (фаза–фаза, фаза–нейтраль);

- змінний струм (TRUE RMS): від 0,001 А до 1200 А;
- частоту: 45–65 Гц;
- фазовий кут: $-180^{\circ} \dots 180^{\circ}$;
- коефіцієнт потужності: від 0,01 до 1,00;
- активну потужність в діапазоні від 0,001 кВт до 9,999 МВт;
- повну потужність: від 0,001 кВА до 9,999 МВА;
- реактивну потужність: від 0,001 кВАр до 9,999 МВАр;
- активну енергію (WH): від 0,001 кВт • год до 9,999 МВт • год;
- повну енергію (SH): від 0,001 кВА • год до 9,999 МВА • год;
- реактивну енергію (QH): від 0,001 кВАр • год до 9,999 МВАр • год.

Прилад АКТАКОМ АСМ–3192 відповідає стандартам безпеки IEC1010 CATIII 600V.

Монографія

**РЕЗОНАНСНЕ ЕНЕРГООЩАДНЕ
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

**ТОМ 3
ПЛАЗМО-МЕХАНІЧНЕ РУЙНУВАННЯ ВИБОЇВ**

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного технічного університету України
«Київського політехнічного інституту імені Ігоря
Сікорського» (протокол № 5 від 14 травня 2018)*

Підписано до друку 17.05.2018 Формат 60х84 1/16
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура: Times.
Ум. друк. арк. 8,6. Тираж 100 прим.

Видавництво «Вік принт»
вул. Кулібіна, 11-а, оф. 204, м.Київ, 03062
тел./факс: 206-08-57

Свідоцтво про внесення до Держреєстру
серія ДК № 4650 від 06.11.2013 р.



ТЕРЕНТЬСВ Олег Маркович – д.т.н., професор кафедри електромеханічного обладнання енергоємних виробництв КПІ ім. Ігоря Сікорського. Нагороджений знаками «Відмінник освіти України» та «Викладач-дослідник». Засновник наукового напрямку «Фізико-технічні основи керування внутрішнім потенціалом середовищ». Підготував 5 кандидатів технічних наук. Опубліковано понад 250 наукових робіт, 32 патенти.



КРЮЧКОВ Анатолій Іванович – к.т.н., доцент кафедри інженерної екології КПІ ім. Ігоря Сікорського. Напрямки наукових досліджень: фізичні процеси руйнування в геотехнології та електромагнітні та деформаційні поля в твердих середовищах. За результатами досліджень опубліковано понад 240 наукових робіт, 7 патентів.



КЛЕЩОВ Антон Йосипович – PhD, лауреат премії Верховної ради України в галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок. Автор 30-ти наукових робіт, серед яких 3 патенти та 2 статті, що включені до бази Scopus.



ГОНТАРЬ Павло Анатолійович – PhD, призер міжнародного форуму-конкурсу «Проблеми надрокористування». Автор 14 наукових робіт, серед них 1 патент на винахід.